



# Bachelorthesis

Entwicklung und Auslegung einer Saatgut-Matte mit der  
Nährstoff-Film-Technik als Bewässerungsmethode für eine mobile  
entfaltbare Pflanzenanbaueinheit

Nora Volling  
Matrikelnummer: 5017803

Abgabe: 21.04.2021

Hochschule Bremen  
Fakultät 5 - Natur und Technik, Abteilung Maschinenbau  
Luft- und Raumfahrttechnik (B. Eng.)

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Uwe Apel  
Zweitprüferin: Prof. Dr. Anja Noke

## Erklärung über das eigenständige Erstellen der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht.

Diese Erklärung erstreckt sich auch auf in der Arbeit enthaltene Grafiken, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie auf Quellen aus dem Internet.

Die Arbeit habe ich in gleicher oder ähnlicher Form auch auszugsweise noch nicht als Bestandteil einer Prüfungs- oder Studienleistung vorgelegt.

Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Version der Arbeit vollständig mit der Druckversion übereinstimmt.

Vor- und Nachname: Nora Volling

Matrikelnummer: 5017803

Bremen, den 21.04.2021

N. Volling

## Kurzfassung

Diese Bachelorarbeit beschreibt die Auslegung einer Saatgut-Matte (SCM) für eine mobile entfaltbare Pflanzenanbaueinheit (MEPA) mit der Nährstoff-Film-Technik (NFT) als hydroponische Bewässerungsmethode. Im Rahmen der Arbeit wird eine Saatgut-Matte in kleinerem Maßstab gefertigt und in einer Versuchsreihe getestet. Ziel der Arbeit ist es, ein System auszulegen, welches sich für die Pflanzenanzucht innerhalb des MEPA Projekts eignet.

Die Auslegung erfolgt nach dem Erstellen von Anforderungen, welche aus dem MEPA-System, der gewählten Bewässerungsmethode und den pflanzenspezifischen Eigenschaften hervor gehen. Anschließend kann ein Kanallayout entwickelt, eine Materialauswahl getroffen und ein Ferti-gungsverfahren ausgewählt werden. Zudem werden die Schnittstellen zu den Pflanzen und der Versorgungseinheit der MEPA in der Auslegung berücksichtigt. Auf Grundlage der entwickelten Saatgut-Matte wurde ein Modell angefertigt, um das Funktionsprinzip der Matte zu überprüfen. In einem Laboraufbau wurde über einen Testzeitraum von vier Wochen erfolgreich eine Kultur von Salatpflanzen herangezogen. Aufgrund der Versuchsbeobachtungen wird die Saatgut-Matte mit dem ausgelegten Kanallayout und der Materialauswahl als geeignet für das MEPA-System angesehen. Die entworfene Saatgut-Matte kann innerhalb des MEPA-Projekts als Grundlage für weitere Entwicklungen dieses Systems dienen.

## Abstract

This bachelor thesis describes the design of a seed cultivation mat (SCM) for a mobile deployable plant cultivation unit (MEPA) using the nutrient-film technique (NFT) as a hydroponic irrigation method. Within the scope of the work, a seed mat is manufactured on a smaller scale and tested in a series of experiments. The aim of this work is to design a system that is suitable for plant cultivation within the MEPA project.

The design is done after establishing requirements based on the MEPA system, the chosen irrigation method and the plant specific characteristics. A channel layout can then be developed, a material selection made and a manufacturing process chosen. In addition, the interfaces to the plants and the MEPA supply unit are taken into account in the design. Based on the developed seed cultivation mat, a model was made to check the functional principle of the mat. A culture of lettuce plants was successfully grown in a laboratory set-up over a test period of four weeks. Based on the test observations, the seed cultivation mat with the designed channel layout and material selection is considered suitable for the MEPA system. The designed seed cultivation mat can serve as a basis for further developments of this system within the MEPA project.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Die mobile entfaltbare Pflanzenanbaueinheit</b>	<b>3</b>
2.1. Beschreibung der MEPA . . . . .	3
2.2. Bereits erarbeitete Systeme . . . . .	4
2.2.1. Konzept 1 . . . . .	4
2.2.2. Konzept 2 . . . . .	5
2.3. Aktueller Stand . . . . .	7
2.3.1. Versorgungseinheit . . . . .	8
2.3.2. Mobiler Anzuchtisch und Frischwassertank . . . . .	9
<b>3. Hydroponische Bewässerungssysteme</b>	<b>10</b>
3.1. Definition und Arbeitsweise . . . . .	10
3.1.1. Dochtsystem . . . . .	11
3.1.2. Tiefwasserkultur . . . . .	12
3.1.3. Ebbe- und Flutsystem . . . . .	12
3.1.4. Tropfsystem . . . . .	12
3.1.5. Aeroponik . . . . .	13
3.2. Nährstoff-Film-Technik . . . . .	13
3.2.1. Theorie . . . . .	13
3.2.2. Praktisches Beispiel . . . . .	14
3.2.3. Wichtige Parameter . . . . .	15
<b>4. Design und Auslegung der Saatgut-Matte</b>	<b>17</b>
4.1. Anforderungen an die Saatgut-Matte . . . . .	17
4.1.1. Systemanforderungen . . . . .	17
4.1.2. Anforderungen durch die Pflanzeigenschaften . . . . .	18
4.2. Die Kanalanordnung . . . . .	19
4.2.1. Varianten . . . . .	20
4.2.2. Gewähltes Layout . . . . .	22
4.3. Die Folie . . . . .	23
4.3.1. Materialauswahl . . . . .	23
4.3.2. Herstellungsverfahren . . . . .	25
4.4. Die Interfaces . . . . .	27
4.4.1. Das Pflanzeninterface . . . . .	27
4.4.2. Der Adapter . . . . .	28
4.5. Die Tischbefestigung . . . . .	29



4.6. Die zusammengestellte Saatgut-Matte . . . . .	30
<b>5. Vorversuche</b>	<b>33</b>
5.1. Layout-Optionen . . . . .	33
5.1.1. Die erste und zweite Folie . . . . .	33
5.1.2. Die Folie 3a und 3b . . . . .	34
5.1.3. Die vierte und fünfte Folie . . . . .	36
5.2. Durchfluss-Test . . . . .	37
<b>6. Der Versuch</b>	<b>38</b>
6.1. Ziel des Versuchs . . . . .	38
6.2. Versuchsaufbau . . . . .	38
6.3. Komponenten des Versuchs . . . . .	41
6.3.1. Folienschlauch . . . . .	41
6.3.2. Wasserkreislauf . . . . .	43
6.3.3. Lampen . . . . .	46
6.3.4. Messgeräte . . . . .	46
6.4. Versuchsdurchführung . . . . .	48
6.4.1. Die Nährlösung . . . . .	48
6.4.2. Lichteinstellungen . . . . .	49
6.4.3. Das Bewässerungsintervall . . . . .	52
6.4.4. Die Laborumgebung . . . . .	54
6.4.5. Einsetzen der Samen . . . . .	55
6.4.6. Anpassungen am Aufbau . . . . .	55
<b>7. Beobachtungen und Auswertung des Versuchs</b>	<b>57</b>
7.1. Erwartungen . . . . .	57
7.2. Beobachtungen . . . . .	58
7.2.1. Pflanzen- und Wurzelwachstum . . . . .	58
7.2.2. Betrachtung des Folienschlauchs . . . . .	62
7.2.3. Die aufgenommenen Laborwerte . . . . .	63
7.3. Auswertung der Saatgut-Matte . . . . .	64
7.3.1. Verteilung der Nährlösung . . . . .	64
7.3.2. Gesundheit und Qualität der Pflanzen . . . . .	65
7.3.3. Der Folienschlauch und das Pflanzeninterface . . . . .	65
7.4. Diskussion und Ausblick . . . . .	66
<b>8. Fazit</b>	<b>68</b>
<b>A. Darstellungen und Zeichnungen</b>	<b>XI</b>
<b>B. Laboraufzeichnungen</b>	<b>XVI</b>
<b>C. Datenblätter</b>	<b>XX</b>

# Abkürzungsverzeichnis

<b>ASU</b>	Versorgungseinheit (Automated Support Unit)
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CEA</b>	Controlled Environment Agriculture
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
<b>DWC</b>	Tiefwasserkultur (Deep Water Culture)
<b>EC</b>	elektrische Leitfähigkeit (Electric Conductivity)
<b>EDEN</b>	Evolution and Design of Environmentally-closed Nutrition-Sources
<b>FWT</b>	Frischwassertank (Fresh Water Tank)
<b>IGS</b>	aufblasbare Anzuchtstruktur (Inflatable Grow Structure)
<b>IGT</b>	aufblasbarer Anzuchtschlauch (Inflatable Grow Tube)
<b>LED</b>	Licht emittierende Diode (Light Emitting Diode)
<b>MDPE</b>	Polyethylen mittlerer Dichte (Medium Density Polyethylen)
<b>MEPA</b>	mobile entfaltbare Pflanzenanbaueinheit
<b>MGS</b>	Mobiles Rinnen System (Mobile Gully System)
<b>NFT</b>	Nährstoff-Film-Technik (Nutrient Film Technique)
<b>PAR</b>	fotosynthetisch aktive Strahlung (Photosynthetically Active Radiation)
<b>PET</b>	Polyester (Polyethylenterephthalat)
<b>PI</b>	Pflanzeninterface (Plant Interface)
<b>PPFD</b>	Photonenstromdichte (Photosynthetically Active Photon Flux Density)
<b>SCM</b>	Saatgut-Matte (Seed Cultivation Mat)

# Liste der verwendeten Symbole

$A_F$	Fläche des Folienschlauchs
$A_{ges}$	Gesamtfläche des Folienmaterials
$m$	Masse der Folie
$M_F$	Flächengewicht der Folie
$V_{ges}$	verbrauchte Wassermenge
$V_P$	benötigte Wassermenge einer Pflanze
$V_{SM}$	benötigte Wassermenge einer Saatgut-Matte
$P$	Pflanzendichte

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Das erste MEPA-Konzept . . . . .	5
2.2. Zweites Konzept der MEPA . . . . .	6
2.3. Die ASU . . . . .	8
2.4. Die Tischkonstruktion und der Frischwassertank . . . . .	9
3.1. Die unterschiedlichen Hydroponik-Systeme . . . . .	11
3.2. Beispiel-Anzuchtrinnen . . . . .	15
3.3. Beispiel für die Wasserzufuhr . . . . .	15
4.1. Die erstellte Anordnung der Kanäle für die SCM . . . . .	22
4.2. Anordnung der einzelnen Schichten der Triplexfolie . . . . .	24
4.3. Das Impulsschweißgerät der Firma <i>Schabos</i> . . . . .	25
4.4. Der Folienhandroller . . . . .	26
4.5. Das Pflanzeninterface in einer Explosionsdarstellung . . . . .	28
4.6. Der kleine Folien-Adapter . . . . .	29
4.7. CAD-Darstellung des großen Adapters . . . . .	29
4.8. Der Drehverschluss . . . . .	29
4.9. Die zusammengeführten Komponenten der Saatgut-Matte . . . . .	30
4.10. Die Maße der Pflanzeninterface-Anordnung . . . . .	31
5.1. Die erste und zweite angefertigte Folie . . . . .	34
5.2. Die Folie 3 . . . . .	35
5.3. Die vierte und fünfte Folie . . . . .	36
6.1. Schematische Darstellung des geplanten Versuchsaufbaus . . . . .	39
6.2. Ansicht des Laboraufbaus . . . . .	40
6.3. Der Laboraufbau des Nährlösungstanks . . . . .	40
6.4. Die Positionierung der Saatgut-Matte in der Winkelposition . . . . .	41
6.5. Die gewählte Kanalanordnung für die Modell-SCM . . . . .	42
6.6. Die zwei gefertigten Saatgut-Matten für den Versuch . . . . .	43
6.7. Der Filter für den Rückstrom als CAD Darstellung . . . . .	44
6.8. Die für den Versuch zusammengebaute Zeitschaltuhr . . . . .	45
6.9. Detailansicht auf das Zwilling-Zeitrelais H3CR . . . . .	45
6.10. Die Lampe Heliospectra LX-60 . . . . .	46
6.11. Der Quantensensor mit der dazugehörigen Anzeige . . . . .	47
6.12. Das Messgerät zur Bestimmung von EC- und pH-Wert . . . . .	47
6.13. Das Absorptionsspektrum von Chlorophyll . . . . .	50

6.14. Das abgedichtete Sichtfenster . . . . .	56
7.1. Beide Saatgut-Matten an Tag 30 des Versuchs . . . . .	59
7.2. Darstellung der Wurzeln von drei verschiedenen Pflanzen . . . . .	60
7.3. Der Wachstumsverlauf einer Pflanze im Labor . . . . .	61
7.4. In der Matte aufgetretene Materialveränderungen . . . . .	62
7.5. Diagramm aus den Werten des Datenloggers von SCM 1 . . . . .	63
7.6. Eine mögliche Anordnung der MEPA . . . . .	67
A.1. Die Maße der im Versuch verwendeten Saatgut-Matte . . . . .	XI
A.2. Die Positionierung der Pflanzenhalterungen auf der Saatgut-Matte im Laborversuch	XI
A.3. Zeichnung der theoretisch ausgelegten Saatgut-Matte - erste Ansicht . . . . .	XII
A.4. Zeichnung der theoretisch ausgelegten Saatgut-Matte - zweite Ansicht . . . . .	XIII
A.5. Zeichnung der theoretisch ausgelegten Saatgut-Matte - dritte Ansicht . . . . .	XIV
A.6. Zeichnung der Positionen der Interfaces in der Saatgut-Matte . . . . .	XV
B.1. Manuell dokumentierte Labordaten zu der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, dem EC- und pH-Wert . . . . .	XVI
B.2. Diagramm zu der Luftfeuchtigkeit im Labor . . . . .	XVII
B.3. Diagramm zu der Temperatur im Labor . . . . .	XVIII
B.4. Temperaturdiagramm des zweiten Datenloggers . . . . .	XVIII
B.5. Das Sichtfenster in Kanal 1.1 . . . . .	XIX
B.6. Schimmelbildung neben einer Salatpflanze auf der Steinwolle . . . . .	XIX
C.1. Technisches Datenblatt zu den Materialeigenschaften der Triplexfolie . . . . .	XX
C.2. Technische Daten des Bluelab Guardian . . . . .	XXI
C.3. Datenblatt zu dem MQ 200 . . . . .	XXII
C.4. Die Datenangaben zu dem Zwillingsrelais H3CR . . . . .	XXIII

# Tabellenverzeichnis

3.1. Orientierungswerte für die Auslegung der Saatgut-Matte . . . . .	16
4.1. Auflistung der Anforderungen an die Saatgut-Matte . . . . .	18
4.2. Anforderungen durch die pflanzenspezifischen Eigenschaften von Salat . . . . .	19
4.4. Morphologischer Kasten zum Design der Kanäle innerhalb der SCM . . . . .	20
4.5. Auflistung der Einzelgewichte für das gesamte Gewicht der Saatgut-Matte . . . . .	31
5.1. Messwerte im Durchlauftest für die Folie 4 und 5 . . . . .	37
6.1. Das Lichtprogramm für die Keimungsphase . . . . .	52
6.2. Das Lichtprogramm für die Wachstumsphase . . . . .	52
6.3. Auswahl gesammelter Daten . . . . .	53
6.4. Die gewählten Bewässerungsintervalle für den Versuch . . . . .	54
7.1. Die Einteilung der Pflanzen in Wachstumsstadien . . . . .	59
7.2. Gemessene Daten zu dem Pflanzen- und Wurzelwachstum der Pflanzen A, B und C	60

# 1. Einleitung

Im Jahr 2021 leben 7,8 Milliarden Menschen auf der Welt, laut der UN wird im Jahr 2050 bereits eine Bevölkerung von 9,7 Milliarden Menschen erwartet. Die menschliche Population auf der Erde verlangt eine ausreichende Versorgung mit Nahrung. Durch die stetig ansteigende Weltbevölkerung, wächst auch die Notwendigkeit, größere Mengen an Nahrungsmitteln zu produzieren.

Aufgrund des Klimawandels erhöht sich die weltweite Durchschnittstemperatur. Dadurch treten extreme Wetterlagen mit zunehmender Häufigkeit und Intensität auf, Dürreperioden werden länger und die Desertifikation von fruchtbarem Boden schreitet voran. Der höhere Bedarf an Nahrung bei gleichzeitig schwindenden Agrarflächen, zunehmender Wasserknappheit und geringen technologischen Verbesserungen in der Landwirtschaft führt zu steigenden Risiken in der weltweiten Bereitstellung von Nahrung [1]. Aufgrund dieser hervorgerufenen Knappheit von Nahrung und Trinkwasser flüchten weltweit Menschen aus ihren Heimatgebieten. Außerdem veranlassen andere Gründe wie Krieg und Verfolgung Menschen zu einer Flucht, weltweit wird die Zahl an Flüchtlingen auf etwa 79,5 Millionen Menschen geschätzt (Stand Ende 2019) [2].

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Bremen im Institut für Raumfahrtssysteme entwickelt und erprobt die Forschungsgruppe EDEN bio-regenerative Lebenserhaltungssysteme (BLSS). Durch die Verwendung von sogenannten Controlled Environment Agriculture (CEA)-Techniken werden neuartige Gewächshaustechnologien entwickelt, welche für den zukünftigen Einsatz in Habitaten auf Mond und Mars vorgesehen sind.

Ausgelöst durch den Bedarf an neuen Verfahren zur Nahrungsmittelproduktion ist die mobile entfaltbare Pflanzenanbaueinheit (MEPA) als Projekt ins Leben gerufen worden. Da die von der Projektgruppe entwickelten Gewächshaussysteme unabhängig von äußeren Einflüssen und mit geschlossenen Nährstoffkreisläufen arbeiten, bietet sich ein Technologietransfer von der Raumfahrt auf die terrestrische Anwendung an. Die MEPA ist ein System, welches einen ressourcensparenden und ortsunabhängigen Anbau von frischen Nahrungsmitteln ermöglichen soll. Vorgeesehen ist es für einen Einsatz in klimatisch unwirtlichen Regionen, in von Naturkatastrophen betroffenen Gebieten und in Flüchtlingslagern.

In der Entwicklung des MEPA-Systems konnten bereits unterschiedliche Konzepte entworfen werden. Diese beinhalten alle das Subsystem einer Saatgut-Matte (Seed Cultivation Mat, SCM), weshalb auf dieser ein besonderer Fokus in dem gesamten Projektverlauf liegt. Das MEPA-System und die dazugehörige Saatgut-Matte sollen nach dem „Plug and Grow“-Prinzip funktionieren. Dies bedeutet, dass nach dem Aufbau des System lediglich unter der Zugabe von

Frischwasser mit der Nahrungsmittelproduktion begonnen wird. Die neuartige Saatgut-Matte soll wartungs- und reinigungsarm sein sowie einen maximalen Ernteertrag ermöglichen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf der Saatgut-Matte für das MEPA-System. Das Ziel ist die Entwicklung einer funktionsfähigen Saatgut-Matte, welche mithilfe der Nährstoff-Film-Technik eine Anzucht von Pflanzen ermöglicht. Dazu wird im Rahmen der Arbeit ein Versuch durchgeführt, welcher die theoretische Auslegung ergänzen und verifizieren soll.

Innerhalb der Arbeit wird zunächst das MEPA-System mit den zuvor ausgearbeiteten Konzepten und dem aktuellen Projektstand vorgestellt (siehe Kapitel 2). Im nachfolgenden Kapitel 3 werden die hydroponischen Bewässerungstechniken erläutert. Anschließend wird in Kapitel 4 die theoretische Auslegung der Saatgut-Matte dargestellt, bevor in Kapitel 5 und 6 der zu der Entwicklung durchgeführte Versuch beschrieben wird. Eine Auswertung dieses Versuchs erfolgt in Kapitel 7. Die Arbeit wird mit dem Fazit in Kapitel 8 abgeschlossen.



## 2. Die mobile entfaltbare Pflanzenanbaueinheit

Die MEPA wird im DLR in dem Institut für Raumfahrtssysteme von der Forschungsinitiative EDEN (Evolution and Design of Environmentally-Closed Nutrition Sources) entwickelt. Vorgesehen ist die Pflanzenanbaueinheit für den Einsatz in Krisengebieten, beispielsweise in der Unterstützung von Flüchtlingslagern, in von Naturkatastrophen betroffenen Regionen sowie in klimatisch unwirtlichen Verhältnissen wie Wüstengebiete. Das System soll ressourcenschonend und ortsunabhängig arbeiten und bedient sich dafür sogenannten CEA-Technologien. CEA-Technologien kontrollieren für das Pflanzenwachstum notwendige Umweltparameter. Dadurch wird eine sichere Nahrungsmittelproduktion mit verkürzten Wachstumszeiten bei einer zeitgleichen Steigerung des Ernteertrags ermöglicht. [3]

Dieses Kapitel beinhaltet die Vorstellung und Beschreibung des MEPA-Systems. Dabei werden die verschiedenen Stufen der Projektentwicklung berücksichtigt und es wird zuerst auf die zwei aufeinander aufbauenden Konzepte der Pflanzenanbaueinheit eingegangen. Anschließend wird die Neugestaltung des MEPA-Systems aufgrund der veränderten Systemanforderungen beschrieben.

### 2.1. Beschreibung der MEPA

Das MEPA-System soll für eine sichere Nahrungsproduktion unabhängig von äußeren Einflüssen dienen. Im Mittelpunkt der MEPA stehen die hohe Autonomie gegenüber äußeren Umwelteinflüssen und die leichte Transportierbarkeit des Systems. So soll in einem Krisenfall wie beispielsweise einer Naturkatastrophe das System schnell zum Einsatzort gebracht werden, um für die ansässige Bevölkerung eine mittelfristige Versorgung frischer Nahrungsmittel zu gewährleisten. Es handelt sich dabei um Lebensmittel, welche aufgrund ihres hohen Wassergehalts nicht ausreichend lagerfähig für einen langen Transport sind und deshalb vor Ort produziert werden müssen. Dazu zählen beispielsweise Gemüsesorten wie Salat, Tomaten und Gurken.

Die MEPA soll mit Hilfe von Containern über den Seeweg und mit Lastkraftwagen bis zu ihrem Einsatzort zu transportieren sein. Anschließend soll diese von zwei Personen bis zu ihrem Aufstellungsort ohne weitere Hilfsmittel bewegt werden können. Daher sind ein kompaktes Design des Systems im Transportmodus und eine geringe Masse der Anbaueinheit nötig. Am Bestimmungsort angekommen ist vorgesehen, dass die MEPA sich mit einfachen Handgriffen aufbauen lässt und durch eine anfängliche Befüllung mit Wasser das Pflanzenwachstum aktiviert wird. Daraufhin soll das gesamte System vollständig autonom arbeiten können.

Die Pflanzenanbaueinheit besteht aus mehreren Komponenten mit einzelnen Subsystemen, wel-

che dazu dienen, die notwendigen Bedingungen für Pflanzenwachstum zu gewährleisten. Die Komponenten lassen sich in drei Systeme gliedern: einen Anzuchtschlauch, eine Versorgungseinheit und eine Saatgut-Matte. Unter Kontrolle stehen Umweltparameter wie die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur sowie eine künstliche Beleuchtung und die Bewässerungsqualität. Außerdem kann durch den Anzuchtschlauch eine künstliche Atmosphäre geschaffen werden, welche die Pflanze von dem natürlichen Umfeld entkoppelt. Innerhalb der MEPA ist ein zirkulierender Wasserkreislauf vorgesehen. Außer durch die natürliche Pflanzentranspiration entweicht kein Wasser diesem Kreislauf. Dadurch auftretendes Kondenswasser kann an der Hülle des Anzuchtschlauchs aufgefangen und im Anschluss wieder der Produktion der Pflanzen zugeführt werden. Um die Selbstständigkeit der Anzuchteinheit weiter zu sichern, wird die von den einzelnen Komponenten und Subsystemen benötigte Energie mit Solarzellen generiert. Diese befinden sich auf der Versorgungseinheit der MEPA, zu der die Energie direkt transportiert wird. Zusätzlich werden Batterien geladen, um eine dauerhafte Stromversorgung zu gewährleisten. [3]

## 2.2. Bereits erarbeitete Systeme

Innerhalb der Projektgruppe EDEN wurden bereits mehrere Varianten der MEPA entwickelt. Auf den bestehenden Konzepten baut die derzeitige MEPA-Version auf, für welche die Saatgut-Matte innerhalb dieser Arbeit ausgelegt wird.

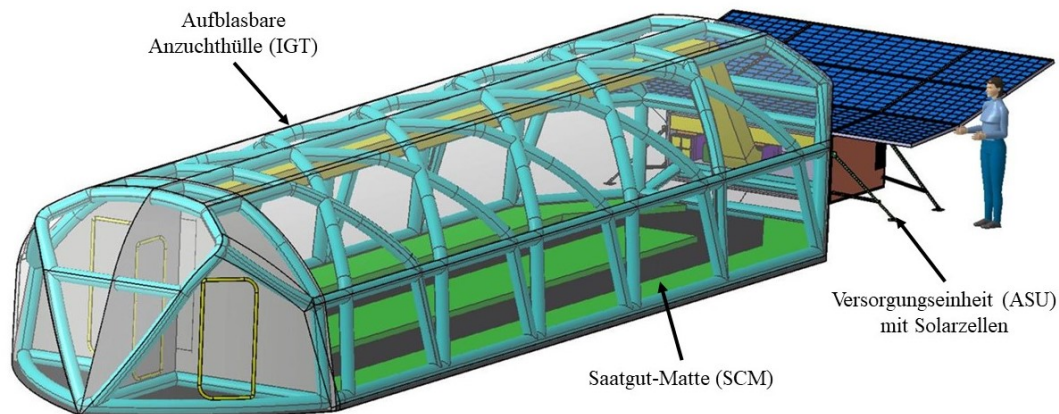
Die erarbeiteten MEPA-Konzepte werden im Folgenden vorgestellt. Dies dient dazu, ein besseres Verständnis für das MEPA-System zu schaffen und die Vorgehensweise in der Entwicklung der Saatgut-Matte einordnen zu können.

### 2.2.1. Konzept 1

Das erste Konzept der MEPA bildet eine Basis, auf welcher die weiteren Designentwicklungen aufbauen. Dieses System wurde von Waldemar Cekusov in einer Bachelorarbeit mit dem Titel „Systementwicklung und Design einer mobilen entfaltbaren Pflanzenanbaueinheit für den Einsatz in Krisenregionen“ entworfen. In der Abbildung 2.1 ist dieses erste Konzept dargestellt. Es besteht aus den drei Hauptsystemen Versorgungseinheit (Automated Support Unit, ASU), aufblasbarer Anzuchtschlauch (Inflatable Grow Tube, IGT) und SCM, welche in den folgenden Abschnitten erläutert werden. [4]

#### Automated Support Unit

In der ASU sind alle Subsysteme integriert, welche nötig sind, um einen einwandfreien Betrieb der MEPA zu gewährleisten. Dazu gehören sämtliche elektronischen Bestandteile, das Atmosphärenmanagement, die Komponenten für die Nährstoffversorgung sowie alle weiteren Regelungseinheiten, welche für die angewendeten CEA-Verfahren notwendig sind. Die Versorgung dieser Systeme mit Energie erfolgt über eine ausklappbare Einheit mit Solarzellen. Die ASU bildet dadurch als Ganzes die Transporteinheit, in welcher sämtliche Komponenten verstaut und sicher zum Einsatzort gebracht werden können.



**Abb. 2.1.:** Das erste MEPA-Konzept bestehend aus ASU, IGT und SCM [4]

### Inflatable Grow Tube

Die entfaltbare Anzuchtröhre der MEPA ist nach dem Aufbau das größte Element und beherbergt die SCM. Mit Hilfe von Druckluft werden Kammern innerhalb der Strukturhülle gefüllt, wodurch die Anzuchtröhre aufgespannt wird. Außerdem befinden sich an der Luftkammer flexible Licht emittierende Diode (Light Emitting Diode, LED) Lampen, welche zur Beleuchtung der Pflanzen dienen.

Die gesamte Struktur ist vor dem Aufbau im Transportmodus vollständig an der ASU angebracht. Nach dem Aufbau dieses Systems ist der Anzuchtbereich von der äußeren Umgebung isoliert und die innere Atmosphäre kann auf die Bedürfnisse der Pflanzen abgestimmt werden. Durch diese Unabhängigkeit sind die Temperatur, Licht- und Feuchtigkeitsverhältnisse regulierbar. Außerdem bietet die Hülle einen Schutz gegenüber harschem Wetter und vor Schädlingsbefall.

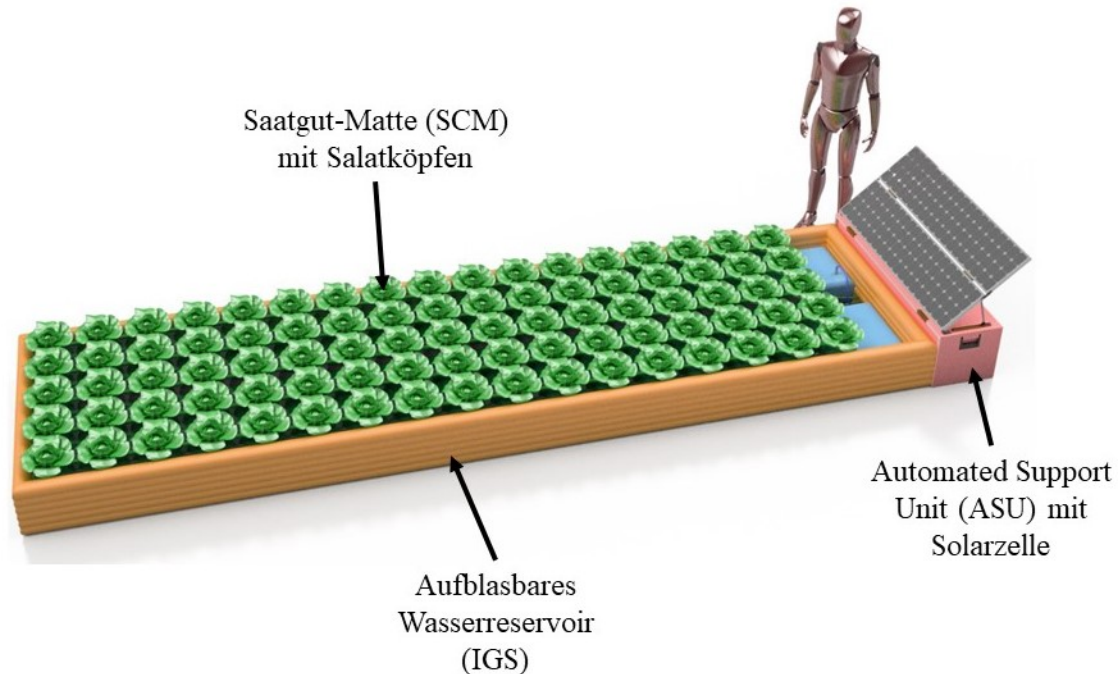
### Seed Cultivation Mat

Die SCM ist das Kernelement der MEPA, auf welcher die Pflanzen angebaut werden. In dieser MEPA-Version ist ein Anzuchtschlauch vorgesehen, in welchem sich ein Trägermedium versetzt mit Nährstoffen befindet. Über kleine Leitungen wird dieser Anzuchtschlauch mit Wasser aus einem Tank befüllt und die Pflanzenkultivierung gestartet. Um eine optimale Belüftung der Wurzeln zu erreichen, sind Luftkanäle in der Matte integriert. Die SCM ist für den einmaligen Gebrauch bestimmt, sodass die Matte nach einer beendeten Wachstumsphase entfernt und durch eine neue ersetzt werden muss.

## **2.2.2. Konzept 2**

Das zweite Konzept wurde im Rahmen einer Masterarbeit mit dem Titel „Systemanalyse zur Weiterentwicklung des MEPA-Systems für die Pflanzenkultivierung in extraterrestrischen Le-

bensräumen und terrestrischen Notstandssituationen“ [5] von Marvin Lipps erstellt. Diese MEPA-Variante ist in der Abbildung 2.2 zu sehen. Auffällig ist der Wegfall der gesamten Anzuchttröhre in dieser Version. Dies wird von Lipps mit der schlechten Zugänglichkeit zu den Pflanzen begründet.



**Abb. 2.2.:** Zweites Konzept der MEPA. Es besteht aus dem aufblasbarem Wasserreservoir (IGT), der nebenstehenden ASU und der auf der Nährlösung schwimmenden SCM [5]

Zu den Hauptsystemen zählen weiterhin die ASU und die SCM. Neuartig ist die sogenannte aufblasbare Anzuchtstruktur (Inflatable Grow Structure, IGS), welche einen aufblasbaren Rahmen um die Anzuchtfläche bildet. Dadurch wird die Verwendung einer Tiefwasserkultur (Deep Water Culture, DWC) ermöglicht. Durch das Entfallen des IGT ist keine Möglichkeit zur Atmosphärenkontrolle und künstlichen Beleuchtung im System vorgesehen. Die MEPA ist somit kein vollständig geschlossenes System gegenüber der Außenwelt.

### Automated Support Unit

In der Gestaltung der ASU haben sich im Vergleich zu der vorherigen Version die wesentlichen Funktionen nicht geändert. Sie beinhaltet weiterhin alle elektrischen Komponenten und betreibt die Subsysteme mit Hilfe einer Anordnung von Solarzellen. In der ASU sind auch der Tank für die Nährlösung sowie die Sensoren zum Messen der Nährlösungsparameter positioniert. An ihr ist direkt die IGS angebracht.

### Seed Cultivation Mat

Die Wahl für die hydroponische Bewässerung mit einer Tiefwasserkultur beeinflusst maßgeblich das Design der Saatgut-Matte. Hydroponische Bewässerungssysteme werden in Kapitel 3 erklärt. Die Matte soll lediglich auf der Nährlösung schwimmen und enthält zu diesem Zweck eine in der Matte eingearbeitete Schwimmkörperstruktur. Diese ist wiederum direkt abhängig in

ihrer Anordnung von der Wahl der Pflanzenart und deren spezifischen Abständen zueinander. Zu Beispielzwecken erfolgte die Auslegung für eine Monokultur von Salat, wodurch eine simple Gestaltung ermöglicht wird. Diese Einfachheit wird weiter unterstützt durch ein flexibles Folienmaterial, welches ein Einrollen der Matte auf ein geringes Packmaß ermöglicht. In der Matte sind die Pflanzenhalterungen integriert, welche eine geringe Menge Substrat und die Samen bereits beim Transport beinhalten. Diese Zusammenstellung ermöglicht einen schnellen Beginn der Kultivierung nach dem Aufbauen und Befüllen des Systems mit Wasser. In der Matte ist eine Leitung für Sauerstoff vorgesehen. Dies ergibt sich aus der Verwendung der Tiefwasserkultur und ermöglicht eine ausreichende Sauerstoffzufuhr für die Wurzelatmung. Durch die bereits integrierten Pflanzenhalterungen ist die Lebensdauer der SCM auf einen Wachstumszyklus der Pflanze beschränkt und muss nach der Ernte ausgetauscht werden.

### **Inflatable Grow Structure**

Die neuartige aufblasbare Rahmenstruktur der MEPA erfüllt zwei Funktionen. Erstens gibt sie der MEPA eine äußere Struktur und Form vor und bildet den Untergrund für die Pflanzenanzucht. Zweitens dient sie zeitgleich als integrierter und abgeschlossener Frischwassertank.

Da dieses System im Folgenden nicht relevant ist, wird auf eine detailliertere Ausführung verzichtet.

## **2.3. Aktueller Stand**

Im Rahmen von Laborversuchen zu den unterschiedlichen Bewässerungsmethoden konnte festgestellt werden, dass ein erfolgreiches Pflanzenwachstum mit Hilfe der Tiefwasserkultur ausgeblieben ist. Aus diesem Grund muss das Design der MEPA erneut überarbeitet und eine alternative Bewässerungsmethode in Betracht gezogen werden. Die Laborversuche zu den Bewässerungstechniken haben einen Erfolg in der Anzucht von Salat mit Hilfe der Nährstoff-Film-Technik (Nutrient Film Technique, NFT) verzeichnet. Das Design des MEPA-Systems wurde in Arbeiten innerhalb der EDEN-Projektgruppe für diese Bewässerungsmethode ausgelegt und wird im Folgenden beschrieben.

Das aktuelle Design sieht aufgrund der Änderung der Bewässerungsmethode keine aufblasbare Außenstruktur mehr vor. Vielmehr soll als Untergrund für die Saatgut-Matte eine Tischkonstruktion dienen, welche durch einen Klappmechanismus zeitgleich stabil im Aufbau und leicht zu transportieren ist. Durch das Ersetzen der IGS durch einen Tischaufbau muss ein zusätzlicher Frischwassertank bereitgestellt werden.

Die aktuelle MEPA setzt sich somit aus vier grundlegenden Komponenten zusammen:

- einer automatisierten Versorgungseinheit - der ASU (engl. Automatet Support Unit)
- einer Tischkonstruktion - die PTC (engl. Portable Table Construction)
- einer Saatgut-Matte - die SCM (engl. Seed-Cultivation-Mat)
- einem Frischwassertank - dem FWT (engl. Fresh Water Tank)

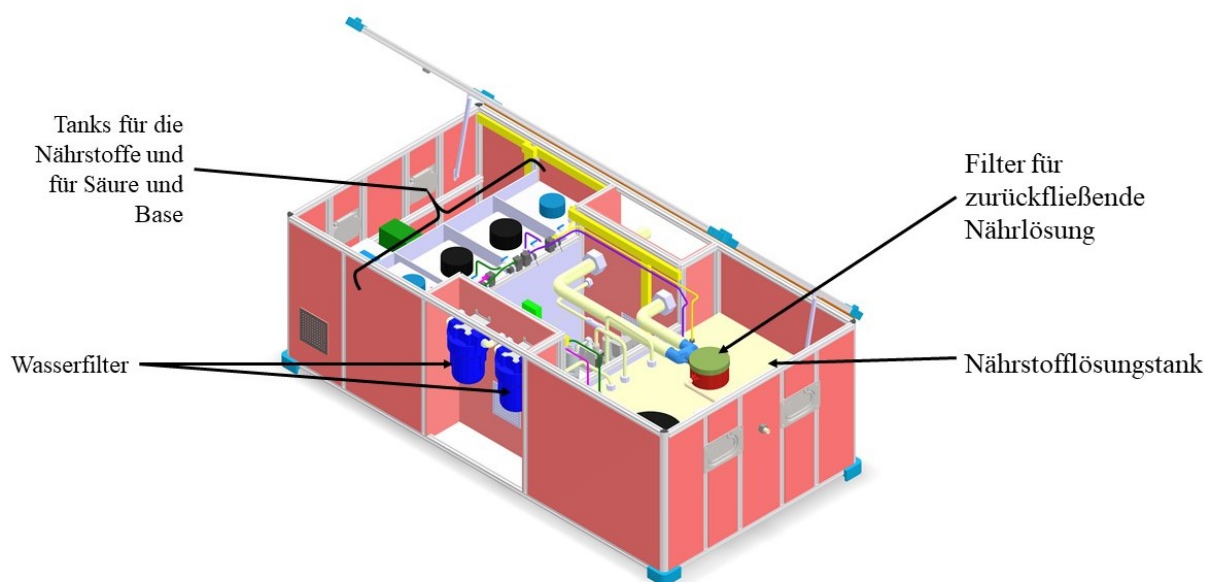
Das MEPA-System wird durch eine Aufteilung in einzelne Subsysteme variabler in der Anwendung. So soll es möglich sein, mit einer ASU und einem Frischwassertank (Fresh Water Tank, FWT) mehrere Anzuchtische zu versorgen.

### 2.3.1. Versorgungseinheit

In der Versorgungseinheit sind weiterhin die elektrischen Komponenten sowie eine Solarzelle zur Energiegewinnung untergebracht. Durch das Entfallen des großen Nährlösungsreservoirs wird ein zusätzlicher Tank für die Bereitstellung der Nährlösung benötigt, welcher in die ASU integriert wird. Je größer dieser Tank ist, desto geringer sind die Schwankungen in der Temperatur, dem Nährstoffgehalt und dem pH-Wert der Lösung.

Vor Beginn der Kultivierung wird der Nährlösungstank mit Wasser aus einem externen Frischwassertank gefüllt und mit Nährstoffen versetzt. Diese Nährstoffe sind in konzentrierter Form in einem zusätzlichen Tank innerhalb der ASU und werden nach Bedarf der Lösung zugesetzt. Für Säure und Base sind ebenfalls zusätzliche Tanks vorgesehen, wodurch eine Regulierung des pH-Wertes möglich ist.

In der Abbildung 2.3 ist die aktuelle ASU im geöffneten Zustand mit den beschriebenen Tankeinheiten und Filtersystemen dargestellt. Die Wasserfilter dienen dazu, einströmendes Wasser aus dem FWT vor der Versetzung mit Nährstoffen zu reinigen. Der Filter für die zurückströmende Nährlösung sorgt dafür, dass keine Pflanzenbestandteile und sonstige Verunreinigungen aus der SCM in den Nährlösungstank gelangen.

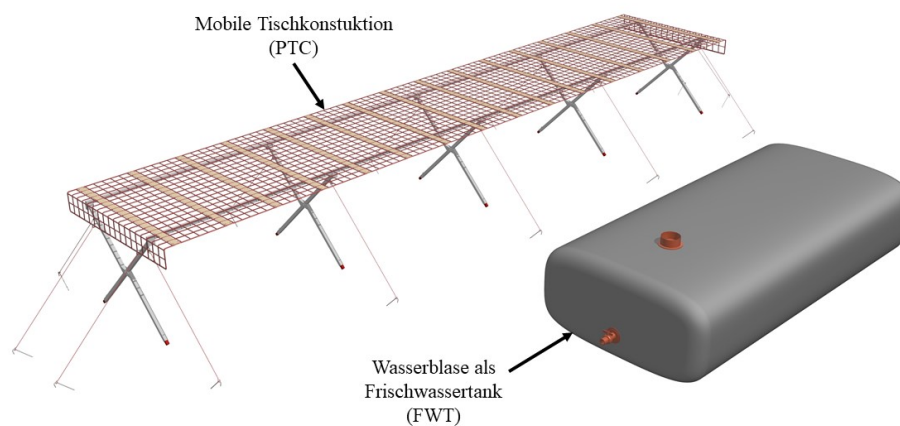


**Abb. 2.3.:** Die ASU - die automatische Versorgungseinheit als CAD-Darstellung. Zu sehen sind für die Nährstoffversorgung relevanten Komponenten: die Nährstofftanks und Säure-/Base-Tanks, die Filtersysteme und der Nährlösungstank



### 2.3.2. Mobiler Anzuchtisch und Frischwassertank

Die Tischkonstruktion besteht aus sogenannten Scherenkreuzen, Verbindungsstreben und einem mit Kunststoffstreben verstärkten Netz. Die Scherenkreuze und die Verbindungsstreben können in einem Stecksystem miteinander verbunden werden und bilden den Unterbau der Konstruktion. Die Kunststoffstreben werden mit diesem Unterbau verbunden und spannen dadurch das Netz auf, sodass die SCM auf dieser Fläche positioniert werden kann. Der Zusammenbau ist in der Abbildung 2.4 dargestellt. In der Darstellung sind ebenfalls Abspannleinen an den Scherenkreuzen zu sehen, welche für zusätzliche Stabilität sorgen. Die Maße von 6 m Länge und 1,2 m Breite der Anzuchtfläche sind in der gleichen Größenordnung angesiedelt wie in dem Design von Herrn Lipps. Dadurch sind beide Systeme in der Quadratmeterzahl der Anbaufläche vergleichbar groß.



**Abb. 2.4.:** Die Tischkonstruktion und der Frischwassertank als CAD-Darstellung

Der Frischwassertank soll vor Ort mit Wasser befüllt werden, wobei dieses keine Trinkwasserqualität aufweisen muss. Durch die in der ASU installierten Filtersysteme kann verunreinigtes Wasser für die Herstellung der Nährlösung ausreichend aufbereitet werden. Als FWT dient eine Wasserblase, welche für den Transport zu einem kompakten Packmaß zusammengefaltet werden kann.

Auf der Grundlage aller beschriebenen Komponenten kann die Saatgut-Matte entwickelt werden. Es werden zunächst noch die Hintergründe der hydroponischen Bewässerung erklärt, bevor im Kapitel 4 die Anforderungen und weitere Auslegung der Saatgut-Matte beschrieben werden.

## 3. Hydroponische Bewässerungssysteme

In diesem Kapitel wird eine Einführung in hydroponische Bewässerungssysteme gegeben. Dazu gehört eine kurze Definition und eine Erläuterung der grundlegenden Funktionsweisen. Außerdem werden die geläufigsten Arten von hydroponischen Bewässerungssystemen vorgestellt. Dies dient zu einer besseren Einordnung der im Abschnitt 3.2 beschriebenen NFT, die als Bewässerungsmethode für die MEPA ausgewählt wurde.

### 3.1. Definition und Arbeitsweise

Allgemein wird der Pflanzenanbau in Nährstofflösungen als Hydroponik bezeichnet. Erstmals wurde der Begriff der Hydroponik im Jahr 1937 von Dr. William F. Gericke verwendet. Bezog sich die Bezeichnung vorerst nur auf vollständig substratlose Systeme, umfasst Hydroponik heute auch substrat-basierte Anbaumethoden. Es werden folglich zwei Arten von hydroponischen Systemen unterschieden. [6]

Bei (fast) vollständig substratlosen Systemen werden die Pflanzen ausschließlich mit Nährstofflösungen und Sauerstoff versorgt. Indem die Pflanzen in Halterungen positioniert sind, können die Wurzeln von der Nährlösung umspült werden. Falls Substrat verwendet wird, geschieht dies in kleinen Mengen und dient dazu, die Pflanze in ihrer Position zu halten. So kann bei Setzlingen beispielsweise Watte verwendet werden, um diese besser in der Halterung zu befestigen oder die Samen werden oberhalb der Nährlösung in einem Inertmedium angezogen. Durch den hohen Anteil von Nährlösung im System werden die Pflanzen immer ausreichend mit Flüssigkeit und Nährstoffen versorgt. Damit die Wurzeln genügend Sauerstoff erhalten, muss die Lösung zusätzlich mit diesem angereichert werden.

Bei dem hydroponischen Anbau mit Substrat wird eine bedeutende Menge an nährstofflosem Substrat verwendet. Hierbei kann es sich beispielsweise um Ton oder Kies handeln. Das Substrat dient dazu, die Pflanze und ihre Wurzeln zu stützen. Es wird von der Nährstofflösung in regelmäßigen Abständen umspült, sodass die Wurzeln stets feucht gehalten werden. Eine Anreicherung der Lösung mit Sauerstoff ist in diesem Fall nicht nötig, da dieser zwischen den Bewässerungsphasen ausreichend an die Wurzeln gelangen kann. [7]

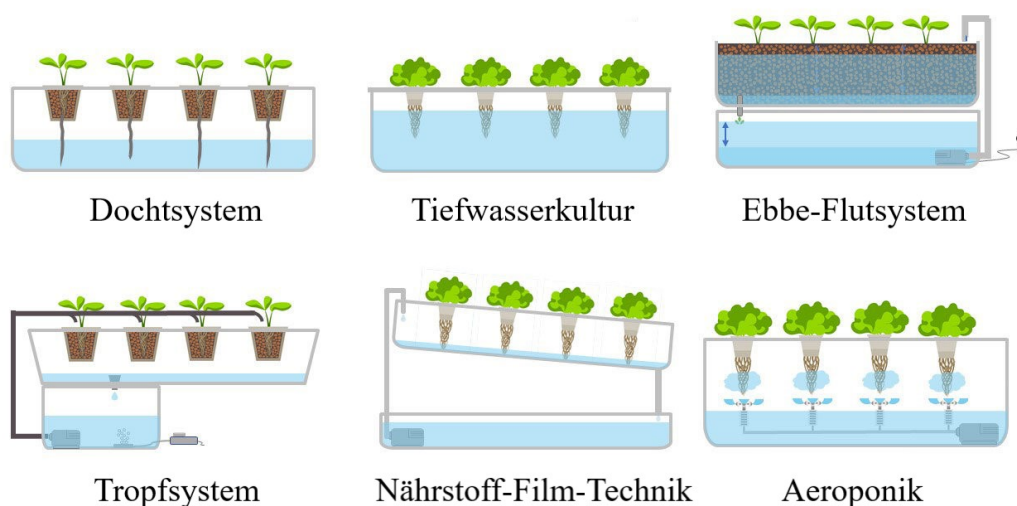
Zu den von Pflanzen benötigten Nährstoffen gehören hauptsächlich Stickstoff, Phosphor, Kalium, Kalzium, Magnesium, Schwefel und Eisen. Um die Nährstofflösung herzustellen, müssen die einzelnen Chemikalien mit Wasser vermengt werden. Dazu können fertige Chemikalienmischungen gekauft oder die Lösung selbst angesetzt werden. Je nach Pflanzenart gibt es auch auf die Pflanzenbedürfnisse angepasste Lösungen.

In der Anwendung der Lösung gibt es unterschiedliche Herangehensweisen. Entweder kann die Lösung einmal oder mehrfach verwendet werden. Bei der einfachen Verwendung ist sichergestellt,



dass alle Pflanzen die benötigten Nährstoffe aufnehmen können und keine eventuell vorhandenen Krankheiten im Wassersystem verbreitet werden. Anders ist dies bei der mehrfachen Anwendung, bei welcher die Flüssigkeit zirkuliert und sich somit Keime im gesamten System verbreiten können. Hier ist zudem eine Aufbereitung der Lösung je nach Verbrauch der Nährstoffe nötig. Vorteilhaft bei der Mehrfachverwendung ist jedoch ein reduzierter Wasserverbrauch. [7]

Unterschieden werden die hydroponischen Bewässerungssysteme in der Funktionsweise, wie die Pflanzen in den Kontakt mit Wasser und Nährstoffen gebracht werden. Grob können diese Systeme in sechs Kategorien eingeteilt werden, wobei es keine scharfen Abgrenzungen gibt, sondern auch Mischformen der einzelnen Systeme auftreten können. In der Abbildung 3.1 sind die sechs Systeme schematisch abgebildet: das Dochtsystem, die Tiefwasserkultur, das Ebbe-Flutsystem, das Tropfsystem, die Nährstoff-Film-Technik und die Aeroponik. Die Nährstoff-Film-Technik ist die relevante Methode für die Erstellung dieser Bachelorarbeit und wird in Abschnitt 3.2 beschrieben. In den nachfolgenden Abschnitten 3.1.1-3.1.5 werden die weiteren Systeme näher beschrieben.



**Abb. 3.1.:** Die unterschiedlichen Hydroponik-Systeme aufgeteilt in ihrer Funktionsweise [8]

### 3.1.1. Dochtsystem

Bei dem Dochtsystem ist ein Substrat über einen Docht mit einem Wasserreservoir verbunden. Aufgrund von Kapillarkräften steigt die Flüssigkeit in das Substrat auf und gelangt dadurch an die Pflanzen. Die erforderlichen Nährstoffe können in der Flüssigkeit gelöst oder bereits in dem Substrat eingearbeitet sein. Durch das Docht-Prinzip arbeitet das System ohne aktive Komponenten wie Pumpen und ist sehr wartungsarm. Eine zusätzliche Anreicherung der Flüssigkeit mit Sauerstoff ist nicht nötig, da das Substrat ausreichend Wurzelatmung zulässt.

Das System ist im Vergleich zu anderen als ineffizient zu bezeichnen, da die Transportfähigkeit

von der Flüssigkeit durch den Docht begrenzt ist. Dadurch steht für diese Anbaumethode nur eine kleine Anzahl an Pflanzenarten zur Auswahl.

### **3.1.2. Tiefwasserkultur**

Die Tiefwasserkultur (DWC) zeichnet sich durch einen abgeschlossenen Wassertank aus, auf welchem eine Halterung für die Pflanzen positioniert wird. Die Halterung kann dabei am Rahmen des Tanks angebracht werden oder auf der Wasseroberfläche selbst schwimmen, wodurch die Wurzeln der Pflanzen frei in einer Wasser-Nährstofflösung hängen und somit dauerhaft versorgt sind. Vorteilhaft bei diesem System ist das hohe Volumen des Wassertanks, wodurch der Nährstoffgehalt und die Temperatur der Lösung gut kontrolliert und auf einem konstanten Niveau gehalten werden können. Das System ist wartungsarm und oft in erhöhten Positionen für eine einfache Aussaat und Ernte installiert. Durch den ständigen Kontakt mit der Nährlösung kann es zu einem Sauerstoffmangel kommen, welchem durch eine Versetzung der Lösung mit zusätzlichem Sauerstoff entgegengewirkt werden kann. [6]

### **3.1.3. Ebbe- und Flutsystem**

Bei dem Ebbe-Flutsystem sind die Pflanzen in einem Behälter mit oder ohne zusätzlichem Substrat positioniert, welches in regelmäßigen Intervallen geflutet wird. Durch dieses vollständige Fluten des Systems kann gewährleistet werden, dass die Pflanzen gleichmäßig versorgt werden. Die Flüssigkeit bleibt ausreichend lang zur Nährstoff- und Flüssigkeitsaufnahme in dem Behälter, bevor sie wieder abgelassen wird. Nach Ablassen der Flüssigkeit steht den Wurzeln wieder genügend Sauerstoff zur Atmung zur Verfügung. Es ist auf die vollständige Entleerung zu achten, um einer Algenbildung oder Wurzelfäulnis vorzubeugen. Die Flüssigkeit kann je nach Anwendungsbedarf einmalig oder mehrfach verwendet werden. [6]

### **3.1.4. Tropfsystem**

Das Tropfsystem ist die häufigste hydroponische Anwendungsart in der kommerziellen Gewächshausproduktion. Hierbei werden mit Hilfe von Versorgungsschläuchen die Pflanzen einzeln mit Wasser oder Nährlösung versorgt. Über spezielle Wasserauslässe in den Schläuchen kann die Flüssigkeit tröpfchenweise und gezielt den Pflanzen zugeführt werden. Dadurch ist eine gleichmäßige und kontrollierbare Versorgung möglich, welche auch für Pflanzen mit größeren Abständen zueinander geeignet ist. Durch das Auffangen überschüssiger Nährlösung kann diese durch Rückführung zurück in den Wasserkreislauf gelangen. Da die Schlauchlängen in Gewächshäusern sehr groß werden können, müssen die Wasserauslässe je nach anliegendem Wasserdruck geregelt werden. Außerdem können diese Auslässe durch Verunreinigungen verstopfen und müssen regelmäßig gewartet werden.[6]

### 3.1.5. Aeroponik

Bei einem aeroponischen System hängen die Pflanzenwurzeln frei in der Luft und werden über Düsen mit einer Nährstofflösung besprüht. Je nach Pflanze kann das Besprühen kontinuierlich oder in Intervallen geschehen, sodass in dem Wurzelbehälter eine hohe Luftfeuchtigkeit entsteht. Die Wurzeln können dadurch optimal mit Flüssigkeit, Nährstoffen und Sauerstoff versorgt werden, wodurch hohe Erträge erzielbar sind. Aufgrund von vielen technischen Komponenten ist das System komplex im Aufbau und erfordert regelmäßige Wartungen. Nicht aufgenommene Flüssigkeit kann von den Wurzeln abtropfen und wieder in den Wasserkreislauf zurückgeführt werden. Dadurch bildet sich am Boden des Wurzelbehälters ein Flüssigkeitsfilm, sodass stark darauf geachtet werden muss, dass kein Algenwachstum auftritt.[6, 9]

## 3.2. Nährstoff-Film-Technik

Die Saatgut-Matte der MEPA soll mit dem Prinzip der Nährstoff-Film-Technik (NFT) arbeiten. Dazu ist es wichtig, die theoretischen Hintergründe zu kennen und die spezifischen Merkmale für diese Bewässerungsmethode zu ermitteln. Um einen genaueren Einblick in die Arbeitsweise zu erhalten, ist es hilfreich, praktische Umsetzungen der Nährstoff-Film-Technik zu betrachten. Aus den gewonnenen Erkenntnissen können im Anschluss die relevanten Parameter dieser hydroponischen Methode gesammelt werden, bevor die Saatgut-Matte ausgelegt wird.

### 3.2.1. Theorie

Wie bei den anderen hydroponischen Bewässerungsmethoden werden bei der NFT Pflanzen mit Hilfe einer Nährlösung angebaut. Bei dieser Methode wird dabei auf die Verwendung von Substrat verzichtet. Die Pflanzenwurzeln sind stattdessen dauerhaft mit dem Nährstofffilm, bestehend aus einer dünnen Schicht von Wasser, Nährstoffen und Sauerstoff, umgeben. [10]

Das System besteht aus parallel nebeneinander angeordneten Kanälen oder Trögen, in welchen die Nährlösung fließt und die mit Halterungen für die Pflanzen ausgestattet sind. Diese Kanäle sind mit einem leichten Gefälle versehen. Um einen zirkulierenden Wasserkreislauf einzustellen, wird die Flüssigkeit am erhöhten Ende der Kanäle mit Hilfe von Pumpen eingeleitet, welche aufgrund der Schwerkraft die Kanäle entlang strömt, bis sie am Endpunkt vollständig abfließen kann und wieder zur Pumpe geführt wird. Die Angaben zu der zu verwendenden Steigung variieren zwischen 0,3 und 5 Prozent. [6, 10]

Die Bewässerung kann bei der NFT entweder kontinuierlich oder in Intervallen erfolgen. Der eingeleitete Wasserstrom soll dabei am oberen Ende des Kanals eine Flussrate von 1 bis 3 Litern pro Minute erreichen. Diese Flussrate variiert je nach Pflanzenart und Wachstumsstadium und soll eine Benetzung der Wurzeln zu jeder Zeit gewährleisten. Ist die Flussrate zu hoch, kann der Kontakt zu Sauerstoff behindert werden und eine verminderte Wurzelatmung zur Folge haben. Im Fall einer zu niedrigen Flussrate können vor allem die Pflanzen am unteren Ende der Kanäle einen Nährstoffmangel erleiden, weil die Nährstoffe von den zuvor platzierten Pflanzen bereits aufgenommen werden [9]. Durch eine zu geringe Steigung oder eine zu geringe Durchflussrate

können außerdem trockene Stellen im Kanalsystem entstehen, welche zu vermeiden sind. In den Kanälen soll eine gleichmäßige Verteilung der Nährlösung angestrebt werden [10].

Um eine Unterversorgung der Pflanzen mit Nährstoffen bei zunehmender Kanallänge zu vermeiden, werden maximale Längen von 16 m bis 20 m empfohlen. Die Kanalbreite ist von der Art der Pflanze und dessen Wurzelwachstum abhängig. Bei größeren Pflanzen, wie beispielsweise der Tomate, werden Kanalbreiten von 15 cm als ausreichend benannt, für Salatpflanzen genügt eine Breite von 8 cm. [6, 9]

Die in den Kanälen fließende Flüssigkeit bildet einen dünnen Wasserstrom, welcher Temperaturunterschiede nicht ausgleichen kann und somit sich und die Wurzeln erwärmt. Dies begünstigt ein zu vermeidendes Algenwachstum, weshalb die Pflanzenkanäle lichtundurchlässig gestaltet werden sollen. [9, 10]

Die Nährlösung kann dem System entweder dauerhaft in einem 24-Stunden-Zyklus oder in Intervallen zugeführt werden. Es gibt unterschiedliche Ansätze in der Gestaltung der Bewässerungsintervalle, welche durch die kurzen Trockenphasen eine gesteigerte Wurzelatmung ermöglichen können. Es ist darauf zu achten, dass die Bewässerungsphasen regelmäßig und mehrfach am Tag verteilt auftreten, da aufgrund der Kanalgestaltung kein Wasser und keine Nährstoffe in diesen gespeichert werden können. Ein anderer Ansatz ist die kontinuierliche Bewässerung während des Tageslichts und ein vollständiges Abschalten der Wasserzufuhr während der Nacht. Die zirkulierende Nährlösung in dem System muss in dem entstandenen Wasserkreislauf gefiltert werden, um ein Verstopfen der Komponenten zu vermeiden. Durch die geringen Wassermengen können sich außerdem krankheitserregende Bakterien schnell verbreiten. Es ist daher ratsam, Geräte zur Bekämpfung der Bakterien einzusetzen. Ein Beispiel hierfür sind UV-Filter. [9, 10]

### 3.2.2. Praktisches Beispiel

Bei der Umsetzung von NFT-Systemen gibt es verschiedene Herangehensweisen. Theoretisch ist die Methode für fast alle Pflanzenarten geeignet [6], besonders gut funktioniert die Anzucht aber von Pflanzen mit kurzen Wachstumsperioden von ca. 30 bis 50 Tagen bis zur Ernte. Dadurch kann ein Verstopfen der Nährlösungskanäle durch zunehmendes Wurzelwachstum vermieden werden. [9]

Weltweiter Hersteller für solche Systeme ist die Firma *Hortiplan N.V.* aus Belgien. Diese Firma ist spezialisiert auf die Planung und Installation des sogenannten NFT-Mobiles Rinnen System (Mobile Gully System, MGS). In diesen Systemen wachsen die Pflanzen in sogenannten Rinnen, die je nach Wachstumsstadium unterschiedliche Abstände zueinander aufweisen.

In externen Anzuchtpaletten werden die Pflanzen gekeimt und anschließend als Jungpflanzen in die Rinnen eingesetzt. Dabei werden Wurzelkissen aus Bambusfaser oder Steinwolle verwendet, um den Pflanzen den nötigen Halt zu geben. Wie in Abbildung 3.2 zu sehen, sind die Rinnen zu Beginn der Kultivierung direkt nebeneinander angeordnet. Sobald die Pflanzen mehr Platz für ihr Wachstum benötigen, verbreitert sich dieser Abstand durch den Aufbau des MGS automatisch. Dadurch wird eine optimale Flächenausnutzung im Gewächshaus erzielt. Der Abstand

der Pflanzen innerhalb einer Rinne ist durch die Abdeckung vorgegeben.

In der Abbildung 3.3 ist der Anfang der Rinnen zu sehen, bei welchem die Nährlösung mit Hilfe von Schläuchen zu den einzelnen Anzuchtrinnen transportiert wird. Am Ende einer Rinne angelangt, wird die überschüssige Flüssigkeit aufgefangen und wieder zum Anfang dieser gepumpt. [11]



**Abb. 3.2.:** Beispiel-Anzuchtrinnen der Firma *Hortiplan*, in welchen die Pflanzen mit einem Wurzelkissen positioniert sind [12]



**Abb. 3.3.:** Beispiel für die Wasserzufuhr: Am erhöhten Ende der Rinnen wird in die einzelnen Kanäle die Nährlösung eingeleitet [12]

Dieses NFT-System ist in der Anschaffung und Planung mit sehr hohen Kosten verbunden. Die Faktoren, die eine Rentabilität beeinflussen, sind dabei vielschichtig. Jedoch kann durch die kurzen Kulturzeiten im Vergleich zur kommerziellen Produktion eine hohe Produktionsrate erzielt werden. Dies ist durch die Regelung des Klimas, einer angepassten Pflanzenernährung und einem minimierten Bedarf an Pflanzenschutz gegenüber Krankheiten und Insekten möglich. Systeme solcher Art sind bereits auf vielen Kontinenten zu finden. So existieren Gewächshäuser mit den NFT-MGS bereits in Deutschland, den Niederlanden, Belgien, Kanada, den USA sowie in Chile, Russland und China. [12]

### 3.2.3. Wichtige Parameter

Die Bewässerung mit der NFT zeichnet sich durch bestimmte Eigenschaften aus, welche bei der Entwicklung der Saatgut-Matte berücksichtigt werden müssen. Diese Eigenschaften sind je nach Anwendungszweck und Pflanzenart auszurichten. Zusammenfassend sind das folgende Kriterien, die bei der Auslegung berücksichtigt werden müssen:

- Länge und Breite der Pflanzenkanäle
- Steigung der Pflanzenkanäle
- Durchflussmenge der Nährlösung
- Zusammensetzung der Nährlösung
- Bewässerungsintervalle

- Zirkulation und Filtrierung des Wasserkreislaufs
- Kontrolle der pH-Werte und des Nährstoffgehalts der Lösung
- Halterung und Positionierung der Pflanzen

Die Auslegung der Saatgut-Matte soll anhand des Beispiels von Salat erfolgen. Dazu sind bereits einige Werte aus den Beschreibungen der theoretischen Grundlagen zu entnehmen. Tabelle 3.1 fasst die bisher genannten Werte für die Parameter der Saatgut-Matte zusammen.

**Tab. 3.1.:** Orientierungswerte für die Auslegung der Saatgut-Matte

Parameter [Einheit]	Wert
Steigung der Kanäle [%]	0,3 - 5
Kanallänge [ <i>m</i> ]	16 - 20
Kanalbreite [ <i>m</i> ]	4 - 8
Durchflussrate [ <i>l/min</i> ]	1 - 3

Diese Werte dienen zur Orientierung für die Entwicklung der Saatgut-Matte und dem hierzu durchzuführenden Versuch. Der theoretische Hintergrund über hydroponische Bewässerungssysteme kann im Folgenden zusammen mit den bisherigen Entwicklungen des MEPA-Systems aus Kapitel 2 genutzt werden, um die Saatgut-Matte auszulegen. Dies ist im folgenden Kapitel 4 beschrieben.

## 4. Design und Auslegung der Saatgut-Matte

In diesem Kapitel wird der Designprozess und die Auslegung der Saatgut-Matte für eine MEPA beschrieben. Das Design wird aus den Anforderungen abgeleitet, welche sich aus den bereits vorliegenden Bedingungen der Konstruktion und der gewählten hydroponischen Bewässerungsmethode zusammensetzen. Aus den formulierten Kriterien kann die Anordnung der Kanäle erstellt werden, in welchen die Nährstofflösung zur Pflanzenanzucht fließen soll. Dazu gehört ebenfalls die geeignete Positionierung der Pflanzenhalterungen sowie das Design der Schnittstellen. Die Saatgut-Matte soll für eine Monokultur mit Salatpflanzen entwickelt werden. Im Rahmen dessen müssen die spezifischen Anforderungen der Pflanze berücksichtigt werden.

Die folgenden Abschnitte erläutern die an die Saatgut-Matte vorliegenden Anforderungen und die daraus resultierende Entwicklung des Layouts. Zu der Auslegung gehört außerdem die Auswahl eines geeigneten Folienmaterials und Herstellungsverfahrens (Abschnitt 4.3.1). Ebenso werden die erforderlichen Schnittstellenelemente in Abschnitt 4.4 erläutert.

### 4.1. Anforderungen an die Saatgut-Matte

Bevor mit der Auslegung begonnen werden kann, müssen die funktionalen Anforderungen an das System Saatgut-Matte definiert werden. Die einzelnen Anforderungen werden in einer Tabelle zusammengefasst und dienen als Grundvoraussetzung für die Saatgut-Matte. Es werden geometrische Rahmenbedingungen vorgegeben sowie Bedingungen an das Material und an die Funktionsweise aufgestellt. Ergänzt werden diese Anforderungen durch die Eigenschaften der Kultursorte Salat, welche für dieses Design als Beispiel dient.

#### 4.1.1. Systemanforderungen

Einige Kriterien an das System können aus den Anforderungen der zweiten MEPA-Variante (siehe Abschnitt 2.2) übernommen werden. Durch den Wechsel in der Bewässerungsmethode und die hierdurch hervorgerufene Veränderung im Aufbau der MEPA muss die Anforderungsliste angepasst bzw. ergänzt werden. In der folgenden Tabelle 4.1 sind die aktualisierten Kriterien an die SCM aufgelistet. Die Anforderungen, welche mit (\*) gekennzeichnet sind, konnten aus der Systemanalyse [5] zur zweiten MEPA-Version übernommen werden. Die Reihenfolge der Auflistung ist unabhängig von der Wichtigkeit des jeweiligen Kriteriums.



**Tab. 4.1.:** Auflistung der Anforderungen an die Saatgut-Matte. Die mit (\*) gekennzeichneten Punkte sind der Ausarbeitung von Marvin Lipps entnommen [5], die übrigen Punkte sind durch die veränderten Rahmenbedingungen der aktualisierten MEPA-Version hinzugefügt oder geändert worden.

Kriterium	Beschreibung der funktionalen Anforderung
1*	Die SCM soll aus einer Trägerfolie bestehen mit den integrierten Einheiten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Adapter zur Pflanzen- und Samenaufnahme, kurz PI (Plant interface)</li> <li>• Eingeschweißte Kanäle zur Nährstoff- und Sauerstoffversorgung sowie zur Wasserzirkulation</li> <li>• Adapter für die Aufnahme eines Schlauchs als Verbindung zu der ASU</li> </ul>
2*	Die SCM soll mit allen integrierten Einheiten ein- und ausrollbar sein für einen kompakten Transport.
3	Die Wasseranschlüsse für den Ein- und Auslass sollen sich an einer Seite der Folie befinden.
4	Die SCM soll für mehrere Wachstumszyklen verwendet werden können. Trotzdem soll ein leichter Austausch der SCM möglich sein.
5*	Die SCM soll mehrere Pflanzenadapter aufnehmen können, angeordnet nach den jeweiligen Anforderungen der genutzten Pflanze.
6*	Es muss ausreichend Platz innerhalb der Kanäle für Wurzelwachstum vorhanden sein.
7*	Die Folie soll resistent gegenüber Sonneneinstrahlung und lichtundurchlässig sein.
8	Die Kanäle müssen die Nährlösung gleichmäßig verteilen und in den benötigten Mengen transportieren können.
9*	Die Pflanzenadapter sollen beim Einrollen der SCM die Kompaktheit dieser nicht beeinträchtigen.
10*	Die Samen im Pflanzeninterface sollen fest positioniert sein.
11*	Für eine Keimung muss das Saatgut anfänglich mit Wasser / der Nährlösung in Kontakt kommen können.
12*	Es darf keine Nährlösung durch die Pflanzenadapter in den Kanälen entweichen können.
13*	Das Pflanzeninterface muss der Pflanze ausreichend Stabilität gegen Umkippen bieten.
14	Die SCM muss auf dem Tischsystem zu befestigen und zu lösen sein.

#### 4.1.2. Anforderungen durch die Pflanzeigenschaften

In dieser Arbeit wird der Fokus auf eine Auslegung der Saatgut-Matte für Salatpflanzen gesetzt. Durch diese Auswahl können weitere Anforderungen formuliert werden, welche ein optimales Wachstum mit maximalem Ernteertrag für Salat ermöglichen sollen. Diese geben vor, welchen Mindestabstand die Pflanzenhalterungen zueinander aufweisen müssen und wie breit die Kanäle



auszulegen sind. In Tabelle 4.2 sind die für Salat spezifischen Eigenschaften aufgelistet, aus welchen die Anforderungen für das Design der Saatgut-Matte entnommen werden können. Die weiteren Eigenschaften werden im Verlauf der Auslegung und anschließend im Versuch (Kapitel 6) eine Rolle spielen.

**Tab. 4.2.:** Anforderungen durch die pflanzenspezifischen Eigenschaften von Salat

Kategorie	Einheit	Wert
Kultivierungszeit	[d]	28 [13]
Abstand	[cm]	20 bis 30 [13]
Kanalbreite	[cm]	4 - 8 [6]
Wasserdurchflussrate	[l/m <sup>2</sup> /h]	3 - 8 [6]
pH-Wert	-	5,6 - 6 [14]
EC-Wert	[mS/cm]	1,15 - 2,5 [14]

Der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit (Electric Conductivity, EC) werden in dem Abschnitt 6.4 näher erläutert. Die für die Saatgut-Matte relevanten Parameter sind die spezifischen Abstände zwischen den Pflanzen und die minimal erforderliche Kanalbreite. Anhand dieser Angaben kann eine Anordnung der Kanäle und Pflanzenhalterungen gefunden werden, welche es ermöglicht, eine maximale Anzahl an Pflanzen auf einer Matte zu kultivieren. Dies dient dem Ziel, einen maximalen Ernteertrag mit einer MEPA zu erzielen.

Es wird ein Abstand zwischen den Pflanzen von 25 cm in den Kanälen festgelegt, weil dieser Wert dem Mittel der pflanzenspezifischen Eigenschaft entspricht. Bei der Verwendung von formfesten Rinnen wird eine Kanalbreite von 4 cm bis 8 cm empfohlen, um genügend Raum für das Wurzelwachstum zu bieten [6]. Da der Folienkanal ohne Befüllung vollkommen flach ist, wird dieser Wert ungefähr verdoppelt auf 15 cm. Somit ist ein ausreichender Puffer für den Platz, den das Wurzelwerk beansprucht, vorhanden.

Soll eine Saatgut-Matte für andere Pflanzenarten ausgelegt werden, können die Rahmenbedingungen aus Abschnitt 4.1.1 übernommen werden. Lediglich die spezifischen Eigenschaften der Pflanze verändern sich, sodass das Design der Kanäle und der Pflanzenhalterungen gegebenenfalls angepasst werden muss.

## 4.2. Die Kanalanordnung

Bei der Kanalanordnung müssen mehrere Punkte berücksichtigt werden, für welche es jeweils mehrere Möglichkeiten zur Umsetzung gibt. Zu diesen Punkten zählt die Zu- und Ableitung der Wasser-Nährstofflösung in und aus der Folie. Der Ein- und Auslass für die Nährlösung soll an einem Ende der SCM sein, wodurch im aufgebauten Modus der MEPA das Schlauchmanagement vereinfacht werden kann. Aus dieser Forderung geht hervor, dass innerhalb der SCM ein Kanal als Zuleitung dienen muss. Außerdem wird eine Wasserblase innerhalb der Matte benötigt, welche für eine gleichmäßige Verteilung der Lösung in die Kanäle dienen soll. Ebenso ist die Gestaltung der Kanäle selbst sowie eine anschließende Zusammenführung dieser durchzuführen.

### 4.2.1. Varianten

Um eine geeignete Lösung zu finden, bietet sich bei der Ausarbeitung ein morphologischer Kasten an. Die Methode des morphologischer Kastens dient zur systematischen Lösungsfindung. So werden zu aufgestellten Teilfunktionen oder -problemstellungen jeweils Teillösungen ausgearbeitet. Durch die Kombination verschiedener Teillösungen können ganz unterschiedliche Ansätze für die Gesamtlösung erstellt werden [15]. Dadurch wird eine Übersicht für die verschiedenen Lösungsansätze geschaffen und diese einzelnen Teillösungen können miteinander verglichen werden. In der Tabelle 4.4 sind in der linken Spalte die Teilfunktionen aufgelistet und nummeriert und nebenstehend die Lösungsmöglichkeiten mit den Buchstaben A, B und gegebenenfalls C angegeben.

**Tab. 4.4.:** Morphologischer Kasten zum Design der Kanäle innerhalb der SCM. Die farbig hinterlegten Felder kennzeichnen die ausgewählten Lösungsansätze für die Gestaltung der Kanalanordnung.

Teilfunktion	Nr.	A	B	C
Zuleitung	1	an einem Rand	mittig	an beiden Seiten
Einlass Wasserblase	2	oberhalb	am Rand	unterhalb
Form Wasserblase	3	rund	rechteckig	abgerundetes Rechteck
Naht in Wasserblase	4	nein	lang	unterbrochen
Kanaleinlass	5	direkt	nur Engstelle	Düse und Diffusor
Form der Kanäle	6	gerade	aufweitend	Kombination gerade und aufweitend
Kanalzusammenführung	7	Wasserblase	zulaufend	-

Aus diesen Lösungsvorschlägen können insgesamt 48 verschiedene Designs herausgearbeitet werden. Die verschiedenen Möglichkeiten werden jeweils miteinander verglichen, um die beste Zusammenstellung der Kanalanordnung zu erhalten. Die Felder der ausgewählten Teillösungen sind farbig hinterlegt, diese Auswahl wird nachfolgend beschrieben.

#### 1. Die Zuleitung

Diese dient dazu, die Flüssigkeit von dem Wasseranschluss bis zur Wasserblase zu transportieren. Wird ein Zulauf in der Mitte oder an beiden Rändern der Folie gewählt, kann das Layout symmetrisch angeordnet werden. Die Symmetrie entsteht entweder durch einen mittigen Zulauf, von welchem jeweils zu beiden Seiten die Anzuchtkanäle abgehen oder durch zwei Zulaufkanäle am Rand der Folie, zwischen welchen die Anzuchtkanäle sich befinden. Es ist jeweils nur ein Anschluss für den Zu- und Ablauf vorgesehen, sodass die Kanäle sich in beiden Varianten überkreuzen müssen. Durch die Eigenschaften der Folie ist es jedoch nicht möglich, sich überkreuzende Kanäle anzulegen. Aus diesem Grund wird die Zuleitung am Rand des Layouts positioniert.

## 2. Der Einlass der Wasserblase

Die Position des Wassereinlasses in die Blase kann von unten, von oben oder seitlich geschehen. Das Wasser soll sich gleichmäßig in der Wasserblase Verteilen, damit die abgehenden Anzuchtkanäle von gleichem Maße versorgt werden. Dies soll mit einer Positionierung des Einlasses mittig von oben in die Wasserblase umgesetzt werden.

## 3. Die Wasserblasenform

Die Form der Wasserblase bestimmt maßgeblich, wie viel Platz diese auf dem Layout der SCM einnimmt. Ziel ist eine maximale Anzahl an Pflanzen, welches mit langen Anzuchtkanälen erreicht wird. Um eine optimale Anordnung der Pflanzen in den Anzuchtkanälen zu erreichen, ist es nötig, die anderen Elemente möglichst platzsparend anzuordnen. Dies kann mit einer länglichen Form der Wasserblase erreicht werden, sodass die Kreisform ausgeschlossen werden kann. Eine rechteckige Form mit abgerundeten Ecken bietet sich an, da sich in einigen Experimenten zum Folienschweißen die Verwendung von scharfen Ecken als nachteilig erwiesen hat.

## 4. Die Naht in der Wasserblase

Mit einer Naht in der Wasserblase wird versucht, die Verteilung der einströmenden Flüssigkeit zu erzielen. Die Naht stellt ein Hindernis dar und lenkt die Strömung zu den Seiten ab. So kann bei einem Einlass in die Wasserblase vermieden werden, dass die Strömung einen Weg des geringsten Widerstands in den direkt darunterliegenden Anzuchtkanal wählt. Deshalb wird die Naht innerhalb der Wasserblase für die theoretische Auslegung vorgesehen. Um die Funktion zu bestätigen, sind weitere Überprüfungen notwendig. Diese werden in Abschnitt 5.1 beschrieben.

## 5. Der Kanaleinlass

Der Übergang zwischen Wasserblase und dem Anzuchtkanal dient dazu, eine gleichmäßige Strömung innerhalb des Kanals herzustellen. Außerdem soll erreicht werden, dass die Flüssigkeit erst in die einzelnen Kanäle fließt, sobald die Wasserblase gefüllt ist. Zu diesem Zweck soll eine Düsen-/Diffusor-Anordnung umgesetzt werden. Dadurch wird eine Engstelle erzeugt, welche die Strömung zurückhalten soll, bis ausreichend Druck durch das Füllen der Wasserblase aufgebaut wird. Anschließend kann der Diffusor für eine gleichmäßige Verteilung innerhalb des Kanals sorgen, damit keine Trockenstellen zurück bleiben. Durch eine geeignete Auswahl der geometrischen Eigenschaften kann außerdem die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst werden und somit auf die Wahl der Pflanzen abgestimmt werden.

## 6. Die Form der Kanäle

Mit der Form der Kanäle wird das Layout maßgeblich bestimmt. Da zwischen den Kanälen ein gewisser Abstand bestehen muss, der durch die Anordnung der Pflanzen bestimmt wird, eignet sich eine parallele Anordnung. Diese ermöglicht außerdem das vollständige Abfließen der Flüssigkeit aus den Kanälen, sobald die Wasserzufuhr unterbrochen wird.

Vor der Zusammenführung der Kanäle sollen diese sich aufweiten, sodass aufstauendem Wasser mehr Raum geboten wird. Zu diesem Zweck wird die Breite der Kanäle erhöht. Hiermit soll einem Austreten der Flüssigkeit durch die unteren Pflanzeninterfaces entgegengewirkt werden.

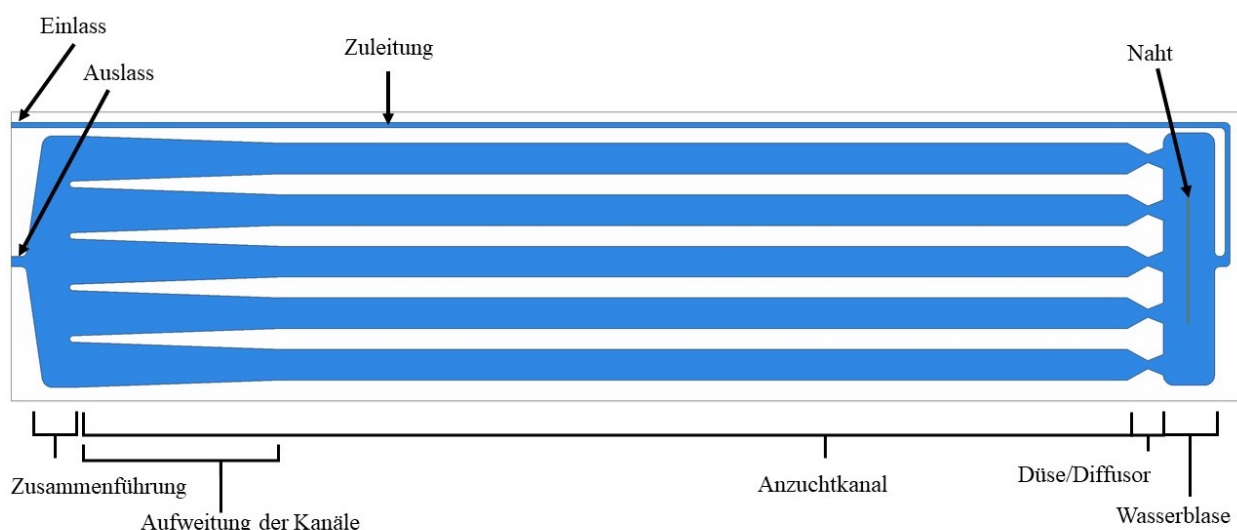
#### 7. Die Kanalzusammenführung

Am unteren Ende der Matte müssen die Kanäle zusammengeführt werden, damit die Flüssigkeit durch einen Wasserabfluss herausgeleitet werden kann. Es soll bei der Zusammenführung möglichst wenig Länge der Kanäle verloren gehen. Eine Wasserblase als Auffangbassin ist aus diesem Grund als nachteilig zu beurteilen. Außerdem darf sich das Wasser durch die leichte Schräglage der SCM nicht sammeln und dadurch unerwünschten Druck im Kanal verursachen. Um dies zu vermeiden, soll die Aufweitung der Kanäle am unteren Ende fortgeführt werden, wodurch sich die abfließende Flüssigkeit auf mehr Fläche verteilen kann.

Die Kombination der Teillösungen ist in der Tabelle 4.4 bereits farblich gekennzeichnet und kann mit der Nummerierung der Teilprobleme und der Zuordnung des Buchstabens der Lösung zusätzlich beschrieben werden. Die Anordnung des Kanallayouts kann anhand der Kombination **1A - 2A - 3C - 4B - 5C - 6C - 7B** beschrieben werden.

#### 4.2.2. Gewähltes Layout

Anhand der ausgewählten Teillösungen kann ein Layout erstellt werden. Abbildung 4.1 zeigt die geplante Anordnung der Kanäle auf der Saatgut-Matte.



**Abb. 4.1.:** Die erstellte Anordnung der Kanäle für die SCM. Zu sehen sind der Einlass mit anschließender Zuleitung, die Naht in der Wasserblase und die einzelnen Abschnitte in dem Anzuchtkanal. Die Kanäle werden in einem Auslass zusammengeführt.

Zu Beginn muss die Nährlösung in die Saatgut-Matte eingeleitet werden. Dafür wird ein schmaler Kanal an dem Rand der SCM positioniert, welcher am oberen Ende der SCM mittig in eine langlochförmige Wasserblase mündet. In der Mitte des Wasserbassins ist eine zusätzliche Schweißnaht eingearbeitet, dadurch kann sich das Wasser optimal in diesem verteilen. Ausgehend von der Wasserblase fließt die Flüssigkeit bei ausreichend Füllstand durch sich im Querschnitt verjüngende Auslässe in die einzelnen Kanäle. Die Anordnung von Düse und Diffusor wird so gestaltet, dass die durchströmende Lösung in ihrer Fließgeschwindigkeit abgebremst wird. Die Kanäle verlaufen zunächst parallel. Bevor die Kanäle in einem Auslass münden, werden diese aufgeweitet. Dadurch kann sich durch die Schräglage der SCM aufstauendes Wasser innerhalb des Kanals verteilen, ohne den Innendruck zu erhöhen, welcher zu einem Auslaufen an den Pflanzenhalterungen führen kann.

Das Design wird so simpel wie möglich gehalten, um Fehlerstellen zu minimieren. Die Kanäle sind 23 cm voneinander entfernt, damit die Salatpflanzen ausreichend Platz zueinander haben, wenn die Pflanzenhalterungen direkt nebeneinander angeordnet werden. Ebenfalls sollen der Ein- und Auslass auf die Größe der Schlauchadapter angepasst sein, sodass diese direkt angebracht werden können.

Die Maße des Layouts und der einzelnen Kanäle können zunächst nur geschätzt und vorgegeben werden. Mit der getroffenen Materialauswahl und dem gewählten Fertigungsverfahren können Tests durchgeführt werden, um das Verhalten der Nährlösung innerhalb der Matte zu beobachten. Dadurch können die vorgegebenen Größen angepasst werden, um die gestellten Anforderungen an die Saatgut-Matte zu erfüllen. In Kapitel 5 sind Vorversuche beschrieben, die für die Bestimmung der optimalen Maße für die Saatgut-Matte durchgeführt wurden.

### 4.3. Die Folie

Die Folie muss den Systemanforderungen aus Abschnitt 4.1.1 entsprechen. Im Einzelnen bedeutet dies, dass ein Material ausgewählt werden muss, welches leicht und zugleich robust gegenüber Umwelteinflüssen sein soll.

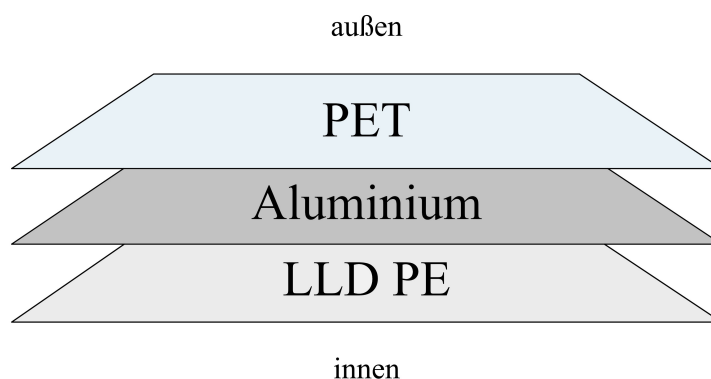
#### 4.3.1. Materialauswahl

Die Materialauswahl ist ein wichtiger Punkt in der Entwicklung der SCM und orientiert sich an den gestellten Anforderungen. Daraus geht hervor, dass ein lebensmittelechtes und widerstandsfähiges Folienmaterial gefordert ist, welches sich leicht verarbeiten lässt. Hier bieten sich diverse kunststoffbasierte Folien an. Durch das Anbringen von Pflanzenhalterungen und Schlauchadaptern entstehen Stellen, an welchen mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit Risse anzunehmen sind, weshalb auch eine ausreichende Widerstandskraft des Materials gegenüber diesen vorhanden sein muss. Durch den Wegfall der aufblasbaren Anzuchttröhre ist das Material den Umwelt- und Klimaeinflüssen ausgesetzt und muss auch in diesem Punkt eine Widerstandsfähigkeit für die Dauer der Verwendung besitzen.

Die ausgewählte Folie von der Firma *AlFiPa* kann die Anforderungen in allen Punkten erfüllen. Es handelt sich um ein Folienlaminat mit drei Schichten bestehend aus Polyester (PET), Aluminium und Polyethylen (LLD PE). Dieses dreischichtige Material wird auch als Triplexfolie

bezeichnet. Durch die Kombination der drei Werkstoffe können die erwünschten Materialeigenschaften kombiniert werden. Die Triplexfolie weist in dieser Kombination absolute Barriereigenschaften auf, sodass keinerlei Flüssigkeiten oder Gase diese Folie im intakten Zustand durchdringen können. Aufgrund dieser Eigenschaft werden Folien dieser Art typischerweise zu Verpackungs- und Isolationszwecken eingesetzt. [16]

Wie in der Abbildung 4.2 zu sehen, wird die Folie mit der PET-Schicht nach außen und der LLD PE-Schicht nach innen verwendet.



**Abb. 4.2.:** Anordnung der einzelnen Schichten der Triplexfolie

Im Vergleich zu anderen Kunststoffen ist PET sehr UV- und witterungsbeständig, resistent gegen schwache Säuren und Laugen sowie neutrale und saure Salze. Zusätzlich weist PET eine hohe Durchschlagfestigkeit auf und ist daher gut als äußere Folienschicht geeignet. Im Inneren wird eine flexible Folienschicht aus LLD PE verwendet, welche bei geringer Dichte eine hohe Steifigkeit und Zugfestigkeit aufweist. Ebenso vorteilhaft für die vorgesehene Anwendung ist die Beständigkeit gegenüber der Spannungsrissebildung. Die Siegfähigkeit der inneren Schicht sorgt für dichte Verbindungsstellen. [17]

Die Aluminiumschicht in der Mitte weist hohe Barriereigenschaften auf und sorgt für die Dichtigkeit des Materials gegenüber Dampf und Feuchtigkeit. Durch die Einarbeitung von Aluminium in der Folie wird bei dieser die Zugfestigkeit erhöht. Außerdem ist diese Schicht lichtundurchlässig und aufgrund der glänzenden Oberfläche liegt eine hohe Wärmereflexion vor. Durch beide Eigenschaften kann eine zu starke Erwärmung des dünnen Nährstofffilms verhindert werden. [18]

Die Folie hat ein Flächengewicht  $M_F$  von  $135,5 \text{ g/m}^2$ . Bei einer geplanten Fläche der Saatgut-Matte von  $1,4 \text{ m} \cdot 6 \text{ m}$  lässt sich das Gewicht der doppelt gelegten Folie wie folgt berechnen:

$$M_F \cdot A_{ges} = m \quad (4.1)$$

$$A_{ges} = 2 \cdot A_F = 2 \cdot 1,4 \text{ m} \cdot 6 \text{ m} = 16,8 \text{ m}^2 \quad (4.2)$$

$$\rightarrow 135,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 16,8 \text{ m}^2 = 2,28 \text{ kg} \quad (4.3)$$

Mit diesem Gewicht des Folienmaterials kann nach der Auslegung der Interfaces ein Gesamtgewicht der SCM berechnet werden.

#### 4.3.2. Herstellungsverfahren

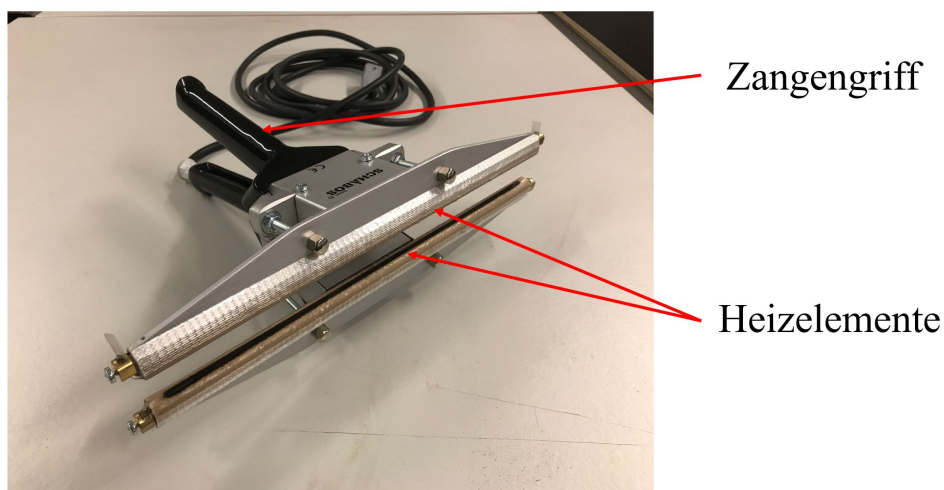
Die Saatgut-Matte besteht aus zwei übereinander gelegten Folien, in welche Nährlösungskanäle eingearbeitet werden. Die Verbindungsstellen der Folie müssen gegenüber Flüssigkeiten abdichtend sein.

Als geeignetes Fügeverfahren wird das Kunststoffschweißen ausgewählt. Hier ist das Heizelementschweißen eine der wichtigsten Techniken. Das Heizelementschweißen ermöglicht das Formen von komplexen Geometrien und eine genaue Reproduzierbarkeit in der Herstellung. Dabei werden mit Hilfe eines Heizelements durch einen direkten Kontakt oder Strahlungswärme die zu verbindenden Flächen erwärmt und durch das Einbringen von Druck zusammengefügt. Die gängigsten Kunststoffe in diesem Verfahren sind Polyethylen und Polypropylen. [19]

Varianten des Heizelementschweißens sind das Heizelement-Wärmeimpulsschweißen und das Wärmekontaktschweißen. Für beide Arten stehen im EDEN-Labor geeignete Geräte zur Verfügung, welche in diesem Abschnitt kurz erläutert werden sollen, bevor eine Methode zur Herstellung ausgewählt wird.

#### Impulsschweißgerät

In der Abbildung 4.3 ist ein sogenanntes Impulsschweißgerät der Firma *Schabos* zu sehen. Dieses Gerät wird im Heizelement-Wärmeimpulsschweißen zum Schweißen von dünnen Folien verwendet. Es ist für den manuellen Gebrauch vorgesehen und wird über das Griffstück bedient. Die Heizelemente des Geräts werden beidseitig an den zu verbindenden Werkstücken positioniert und aneinander gepresst. Die linienförmigen Heizelemente erwärmen unter gleichzeitigem Druck das eingeklemmte Material impulsartig, wodurch es verschweißt wird. [19, 20]



**Abb. 4.3.:** Das Impulsschweißgerät der Firma *Schabos*. Zu erkennen sind die beiden Heizelemente in der Zangenanordnung.

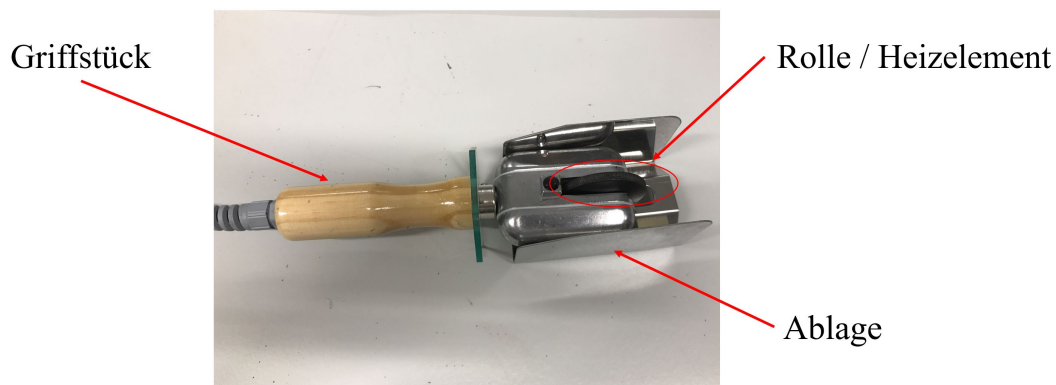


Das Gerät ist einfach in der Handhabung und benötigt keinerlei weitere Hilfsmittel. Am Netzteil des Geräts lässt sich das Zeitintervall und die Temperatur des Heizimpulses regeln. Es eignet sich gut, um Folien miteinander zu verbinden, welche die Länge der Heizelemente nicht überschreiten. Sollen längere Folienstücke abdichtend miteinander verbunden werden, muss das Gerät mehrfach angesetzt werden. Hier können Versetzungen in der Positionierung auftreten und zu Lücken in der Naht führen.

### Handroller

Der Handroller ist dem Heizelement-Wärmekontaktschweißen zuzuordnen. Das Funktionsprinzip ist das Gleiche wie bei dem Wärmeimpulsschweißen, es unterscheidet sich in der Dauer der Wärmeeinbringung in das Heizelement. Bei dem Handroller ist das Heizelement dauerbeheizt und die Einbringung der Wärme wird durch die Kontaktzeit reguliert. [19]

Die Abbildung 4.4 zeigt ein Handfolienschweißgerät, welches mit verschiedenen breiten Rollen ausgestattet werden kann. Zu sehen ist eine Rolle mit 5 mm Breite, welche gleichzeitig das Heizelement darstellt. Der Roller wird von Hand über die zu verschweißenden Werkstücke geführt und aufgrund des Wärmeeintrags der Rolle und des Handdrucks werden diese miteinander gefügt. Es muss je nach Material die Kontaktdauer des Heizelements mit dem Werkstück angepasst werden.



**Abb. 4.4.:** Der Folienhandroller zum Schweißen von Folien. Das Gerät kann in der mitgelieferten Ablage positioniert werden, sodass das Heizelement gesichert ist.

Der Handroller ist flexibel einsetzbar und die zu schweißenden Geometrien sind durch die Form des Heizelements frei wählbar. Am Netzteil des Folienrollers befindet sich ein stufenloser Drehschalter, mit dem sich die anliegende Temperatur einstellen lässt. Aufgrund der dauerhaften Beheizung des Geräts befindet sich zwischen dem Griffstück und der Rolle ein Handschutz aus Plexiglas.

### Auswahl eines Geräts

Vorteil des Impulsschweißgeräts ist eine gleichmäßige Naht auf beiden Seiten des Materials aufgrund der Zangenanordnung der Heizelemente. Durch die beidseitigen Kontaktflächen ist es



jedoch nicht möglich, auf größeren Folienstücken die Mitten zu erreichen, wie es für die Saatgut-Matte notwendig ist. In der Herstellung von langen Nähten muss sehr genau gearbeitet werden, um eventuelle Lücken zu vermeiden. Für das geplante Folienlayout eignet sich das Impulsschweißgerät außerdem nicht, da durch die langen Heizelemente keine komplexen Geometrien gefertigt werden können.

Der Handfolienroller hat einen einseitigen Kontakt zu den zu verbindenden Materialien, wodurch auf eine ordnungsgemäße Ausführung der Naht geachtet werden muss. Beim erneuten Ansetzen des Geräts, um längere Nähte zu fertigen, ist der Übergang stetig zu gestalten, um Lücken ausschließen zu können. Es ist außerdem möglich, komplexere Formen mit Hilfe der Rolle zu schweißen, weshalb diese besser geeignet erscheint als das Impulsschweißgerät für die Herstellung einer Saatgut-Matte.

Aus diesen Gründen wird der Handfolienroller für den Versuch ausgewählt. Da die Kontaktdauer der Rolle auf dem Material, um eine beständige Naht herzustellen, nicht bekannt ist, wurden dazu im Rahmen eines Praktikums in der Projektgruppe gezielte Tests durchgeführt. Aus diesen geht eine Vorschubgeschwindigkeit der Rolle von ca. 10 s pro 10 cm Schweißnaht hervor. [21]

## 4.4. Die Interfaces

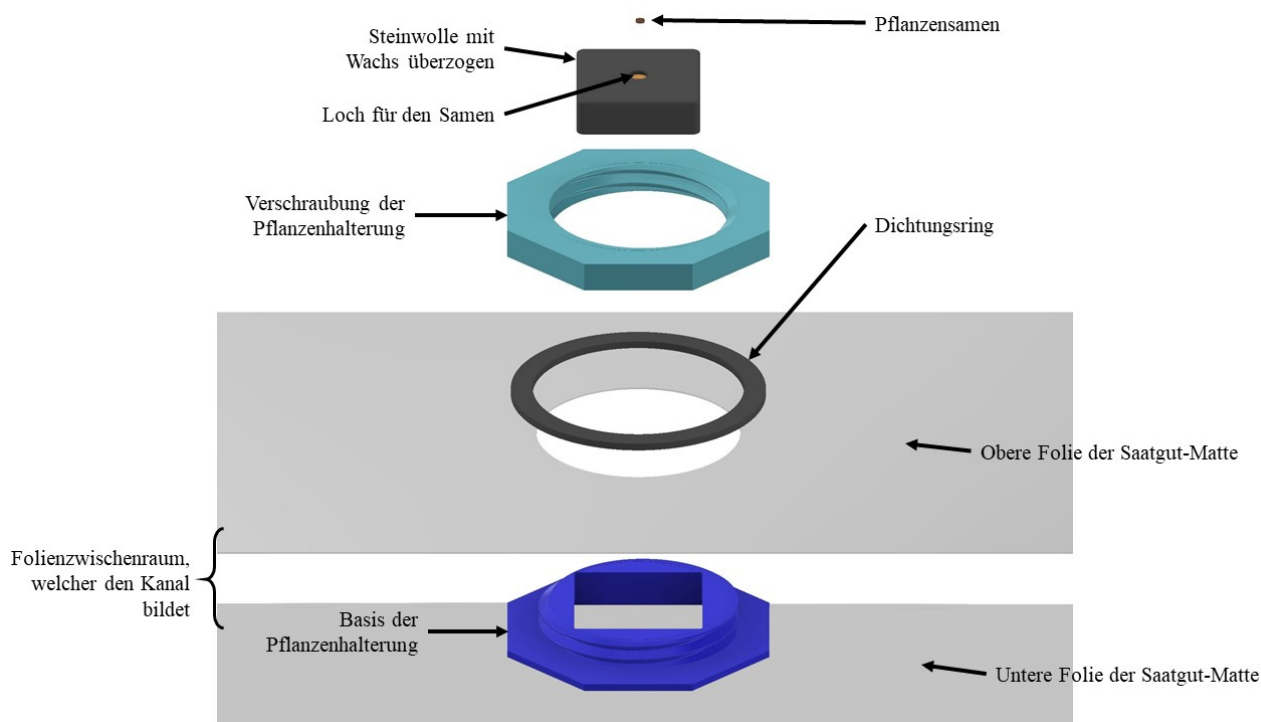
Zu den Interfaces gehören das Pflanzeninterface (Plant Interface, PI) und der Adapter zwischen Folie und Schlauch am Ein- und Ausgang der Nährlösungskanäle. Diese sollen im 3D-Druckverfahren additiv gefertigt werden. Beide Bauteile sind bereits im Vorfeld dieser Arbeit hergestellt und erprobt worden [21]. Aus diesem Grund werden in diesem Abschnitt lediglich die Funktion und der Aufbau beider Komponenten beschrieben.

### 4.4.1. Das Pflanzeninterface

Das Pflanzeninterface bezeichnet als Gesamtes die Schnittstelle zwischen dem Folienmaterial und der Pflanze und besteht aus einer zweiteiligen Pflanzenhalterung, einem Dichtungsring und einem Steinwollestück. Das Interface wird in regelmäßigen Abständen innerhalb der Nährlösungskanäle platziert und dient als Halterung für eine Pflanze. Durch den zweiteiligen Aufbau kann die Halterung fest mit der Folie verbunden werden. Fließt die Nährlösung durch den Folienkanal, wird die Halterung durch den Wasserdruck leicht angehoben und von der Lösung unterspült.

Die Halterung für die Pflanzen weist eine viereckig Öffnung im Inneren auf, in welcher ein Stück Steinwolle positioniert wird. In dieser Steinwolle kann ein Samen herangezogen werden, da diese sich auf der Unterseite mit der durchströmenden Lösung vollsaugt und somit ein ideales Nährmedium darstellt. Zusätzlich wird die Steinwolle auf der Oberseite mit einer Wachsschicht überzogen, um ein Wachstum von unerwünschten Organismen zu minimieren.

Zwischen Adapter und Folie kann ein Dichtungsring eingelegt werden, falls keine ausreichende Abdichtung durch die Verschraubung des Adapters hergestellt wird. Die Explosionsdarstellung 4.5 verdeutlicht den Zusammenbau des gesamten Pflanzeninterfaces in Verbindung mit der Folie. Die Halterung wird additiv in einem 3D-Druckverfahren hergestellt.



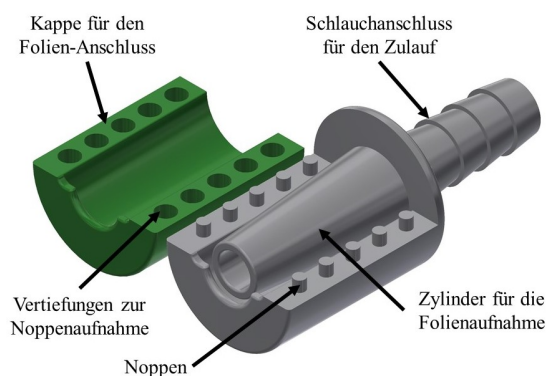
**Abb. 4.5.:** Das Pflanzeninterface in einer Explosionsdarstellung: Zu sehen sind die zweiteilige Pflanzenhalterung, der Dichtungsring, das Steinwollestück, ein Samen und die übereinanderliegenden Folien der Saatgut-Matte, innerhalb welcher die Nährlösung fließen wird.

Bei dem Fertigen der Saatgut-Matte muss darauf geachtet werden, dass die Basis der Halterung vor dem Schweißen der Kanäle eingesetzt wird, da diese andernfalls nicht mehr installiert werden kann. Dieser Prototyp soll innerhalb des Versuchs eingesetzt und für den längeren Anwendungsfall evaluiert werden.

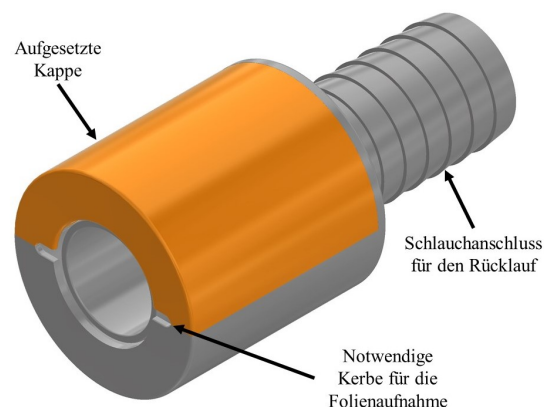
#### 4.4.2. Der Adapter

Der Adapter ermöglicht ein Verbinden des flachen Folienkanals mit den Verbindungsschläuchen, die zu der ASU führen. Für den Ein- und Auslass aus der Saatgut-Matte gibt es zwei unterschiedliche Adaptergrößen. In der Abbildung 4.6 ist der Adapter für den Einlass zu sehen, welcher kleiner als der für den Wasserauslass gestaltet ist. Der in Abbildung 4.7 zu erkennende Adapter für den Auslass muss einen stetigen Abfluss der Flüssigkeit aus der Matte gewährleisten können und zusätzlich Verunreinigungen von den Pflanzen durchlassen, weshalb dieser mit einem größeren Durchmesser versehen ist. Die Schläuche sind den Adaptergrößen angepasst und führen an festgelegte Anschlüsse an der ASU.

Die Folie wird an den entsprechenden Verbindungsstellen vorbereitet und für den Anschluss mit einem speziellen Layout versehen. Mit Hilfe dieses Designs kann die Folie über den Adapter geschoben werden. Vorgesehene Noppen lassen die Folie in den Adapter einhängen, mit einem passenden Gegenstück des Adapters ist die Folie fixiert und kann nicht mehr verrutschen. Zwischen Folie und Adapter kann ein zusätzlich abdichtendes Material wie Teflonband eingesetzt werden, um die Dichtigkeit vollständig zu gewährleisten.



**Abb. 4.6.:** Der kleine Folien-Adapter für den Wassereinlass als CAD-Darstellung im geöffneten Zustand

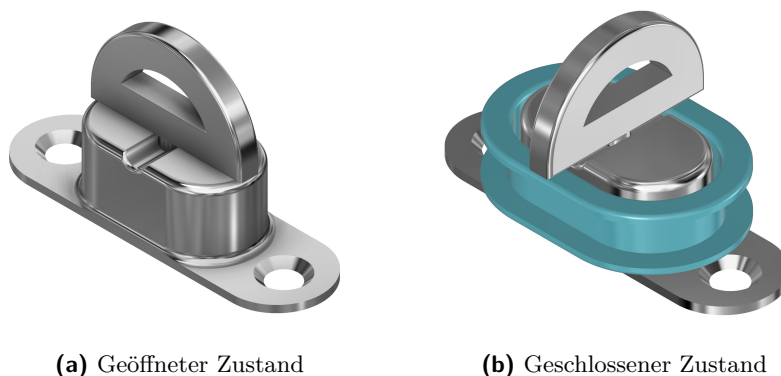


**Abb. 4.7.:** CAD-Darstellung des großen Adapters für den Wasserauslass mit aufgesetzter Kappe

## 4.5. Die Tischbefestigung

Um die Saatgut-Matte sicher auf der Tischkonstruktion zu befestigen, wird eine Verbindungsmöglichkeit benötigt. Diese muss unterschiedliche Varianten der Saatgut-Matte aufnehmen können. Da die SCM austauschbar sein soll, muss es möglich sein, die Matte mehrfach zu montieren und wieder abzunehmen. Um die Kosten für das MEPA-System gering zu halten, wird nach Lösungen gesucht, die bereits als Standardware existieren.

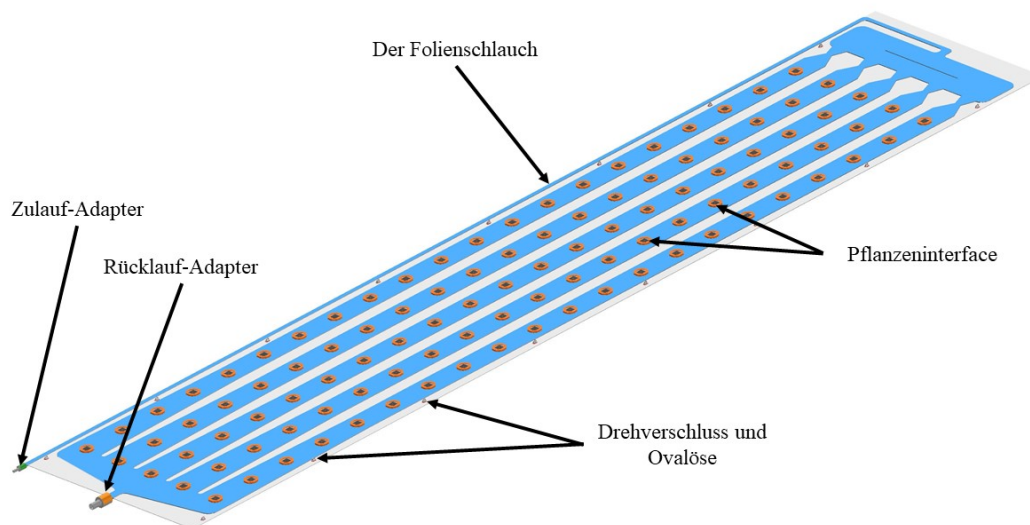
Im Bereich der Planentechnik existieren mehrere Möglichkeiten, um Planen oder Folien an Objekten zu fixieren. Eine gängige Methode ist das Nutzen von Ovalösen in Verbindung mit Drehverschlüssen. Auf der Tischkonstruktion können die Drehverschlüsse auf den Kunststoffleisten montiert und die Ovalösen in dadurch vorgegebene Positionen in die Saatgut-Matte eingearbeitet werden. Die Öse kann über den geöffneten Drehverschluss gelegt werden. Wird der Verschluss um 90 Grad gedreht, kann die Öse nicht mehr abgenommen werden und die damit verbundene Folie ist gesichert. In der Abbildung 4.8 ist ein Beispiel für einen Drehverschluss und eine dazu passende Ovalöse zu sehen.



**Abb. 4.8.:** Der Drehverschluss: (a) geöffnet und (b) geschlossen mit einer beispielhaften Öse. Die Unterseite wird auf der Unterlage montiert und die Öse in die Saatgut-Matte eingearbeitet, wodurch Tisch und SCM verbunden werden können.

## 4.6. Die zusammengestellte Saatgut-Matte

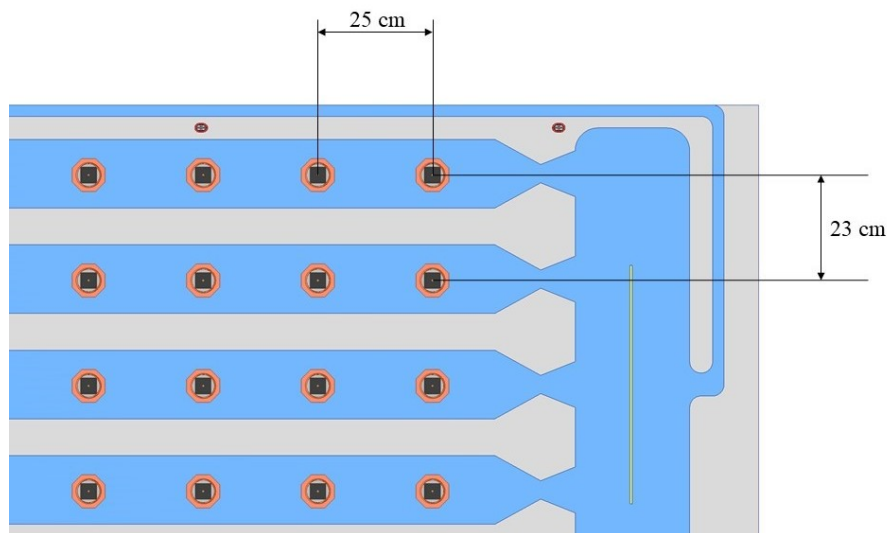
Nach der Auswahl der Kanalanordnung, der Interfaces und der Befestigung auf der Tischkonstruktion kann eine Zusammenstellung der Saatgut-Matte erfolgen. Die Zusammenführung der einzelnen Komponenten stellt die fertig ausgelegte Saatgut-Matte für das MEPA-System dar und ist in der Abbildung 4.9 zu sehen. Die auf dem Bild zu sehende CAD-Darstellung der Saatgut-Matte wurde mit den ermittelten Layout-Maßen aus Kapitel 5 konstruiert.



**Abb. 4.9.:** Die zusammengeführten Komponenten der Saatgut-Matte als CAD-Darstellung. Zu sehen sind der Folienschlauch und die Adapter für Zu- und Rücklauf sowie die Anordnungen von Drehverschluss mit Ovalösen und die Pflanzeninterfaces.

Die abgebildete Saatgut-Matte kann in dieser Ausführung auf der mobilen Tischkonstruktion montiert werden. Nach dem Aufbau werden die Schläuche an den Adaptern angebracht, welche die SCM mit der Versorgungseinheit verbinden. Anschließend ist die Matte einsatzfähig für den Anbau einer Salatkultur. Nach der Ernte wird je nach Zustand der Matte entschieden, ob diese wiederverwendet werden kann. Dies geschieht indem neue Steinwollstücke und Samen eingesetzt werden. Ist die Matte beschädigt oder zu stark gealtert, kann diese vollständig gegen eine neue ausgetauscht werden.

Es können insgesamt 21 Pflanzeninterfaces in einem Abstand von 25 cm auf einem Kanal positioniert werden. Bei den vorgesehenen fünf Kanälen passen somit 105 Interfaces auf eine Saatgut-Matte. In Abbildung 4.10 ist zur Verdeutlichung ein Ausschnitt der Saatgut-Matte mit den positionierten Interfaces dargestellt. Um die Matte auf der Tischkonstruktion ausreichend zu befestigen, werden insgesamt 16 Ösen in einer Matte angebracht. Die genauen Maße zu der Kanal- und PI-Anordnung sowie zu der Ösenpositionierung können den technischen Zeichnungen aus dem Anhang A entnommen werden.



**Abb. 4.10.:** Die Maße der Pflanzeninterface-Anordnung. Bildausschnitt der SCM mit den Pflanzeninterfaces und den horizontalen und vertikalen Abständen zueinander. Innerhalb eines Kanals sind 25 cm Abstand vorgesehen und zwischen den Kanälen jeweils 23 cm.

In Abschnitt 4.3.1 ist die Berechnung der Folienmasse beschrieben. Um das Gesamtgewicht der Saatgut-Matte zu bestimmen, muss das Gewicht aller Pflanzeninterfaces und Ösen sowie den Adaptern summiert werden. Die Aufstellung zu der Gewichtsbestimmung ist in der folgenden Tabelle 4.5 zusammengefasst. Die 3D-Druckteile werden aus dem Material PLA gefertigt, welches eine ungefähre Dichte von  $1,24 \text{ g/cm}^3$  aufweist [22]. Die zu den Komponenten zugehörigen Volumina wurden den jeweiligen CAD-Dateien entnommen, sodass das Gewicht berechnet werden kann. Das gleiche Vorgehen wurde für den Dichtungsring durchgeführt. Für die Steinwolle und die Ovalösen wurden Gewichte geschätzt, weil keine technischen Daten vorliegen.

**Tab. 4.5.:** Auflistung der Einzelgewichte für das gesamte Gewicht der Saatgut-Matte: Eine Auflistung aller Komponenten mit einer Aufschlüsselung zu der Zusammensetzung ihres Gewichts. Summiert kann daraus resultierende Gesamtgewicht der Saatgut-Matte bestimmt werden.

Komponente	Dichte [ $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ]	Volumen [ $\text{cm}^3$ ]	Einzelgewicht [ $\text{kg}$ ]	Anzahl	Gesamt [ $\text{kg}$ ]
Folie	-	-	2,28	1	2,28
PI-Halterung	1,24	30,7	0,038	105	3,99
PI-Dichtungsring	1,46	7,71	0,011	105	1,18
Steinwolle	-	-	0,005	105	0,53
Adapter klein	1,24	126,5	0,157	1	0,157
Adapter groß	1,24	27,75	0,034	1	0,034
Ovalöse	-	-	0,005	16	0,08
					$\Sigma$ 8,25

Das Gesamtgewicht der Saatgut-Matte beträgt laut dieser Berechnung 8,25 kg. Dies sind ungefähr 10 Prozent des für das MEPA-System veranschlagte Gesamtgewicht von 80 kg [3].

Mit dieser Zusammenstellung ist die theoretische Auslegung der Saatgut-Matte abgeschlossen. Das folgende Kapitel 5 beschreibt die durchgeführten Tests, mit welchen die Fertigung der Saatgut-Matte erprobt wird, sowie wie die unbekannten Maße in dem Layout ermittelt werden. In Kapitel 6 wird anschließend der Versuch beschrieben, welcher zur Erprobung der erstellten Kanalanordnung, des Materials und des Pflanzeninterface dient.

## 5. Vorversuche

In diesem Kapitel werden die Versuche näher beschrieben, die als Vervollständigung der Auslegung und als Vorbereitung zu den Versuchen zu der Funktionsweise der Saatgut-Matte dienen. Die Abschnitte dieses Kapitels behandeln jeweils einen Punkt der folgenden Auflistung:

1. Die mit dem Handfolienroller zu schweißenden Geometrien
2. Die Breite des Durchlasses für die Flüssigkeit in die einzelnen Kanäle

Durch die Auslegung dieser Punkte kann im Anschluss die Saatgut-Matte vollständig bemaßt und anschließend gefertigt werden, bevor diese in einem Versuch in Bezug auf die Funktionsweise getestet wird.

### 5.1. Layout-Optionen

Mit dem Herstellen verschiedener Folienschläuche in unterschiedlichen Layouts soll zum einen die Verarbeitung der Folie getestet, zum anderen aber auch die Möglichkeiten in der Umsetzung des eigentlichen Layouts erprobt werden. Hier werden im Laufe der Versuche unterschiedliche Kanal designs getestet. Dazu gehört das Variieren der Kanalbreiten, verschiedene Einarbeitungen in die Kanäle selbst und die Erprobung von der Zusammenführung am Ende der Kanäle. So werden insgesamt fünf verschiedene Folien angefertigt, in jedem Folienschlauch werden ein Zulauf und zwei Anzuchtkanäle eingearbeitet. Mit jeder neuen Ausfertigung werden andere Aspekte in der Umsetzung des Designs erprobt, welche in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden. Nach der Fertigung wird der Folienschlauch an einen Wasserkreislauf angeschlossen, dadurch können alle Nähte auf ihre Dichtigkeit getestet sowie das Verhalten der Flüssigkeit in den Kanälen beobachtet werden. Hier ist besonders die gleichmäßige Verteilung der Flüssigkeit in den einzelnen Kanälen von Interesse, da diese essentiell für die Funktion der Saatgut-Matte ist. Darauf wird im Abschnitt 5.2 näher eingegangen.

Die Kanalanordnungen auf den Folien sind alle nach dem gleichen Muster. An einem Ende sind der Ein- und Auslass zu finden, an der entgegengesetzten Seite ist die Wasserblase vorgesehen. Der Kanal in der Mitte des Layouts wird im Folgenden als *Kanal 1* und der am Rand als *Kanal 2* bezeichnet.

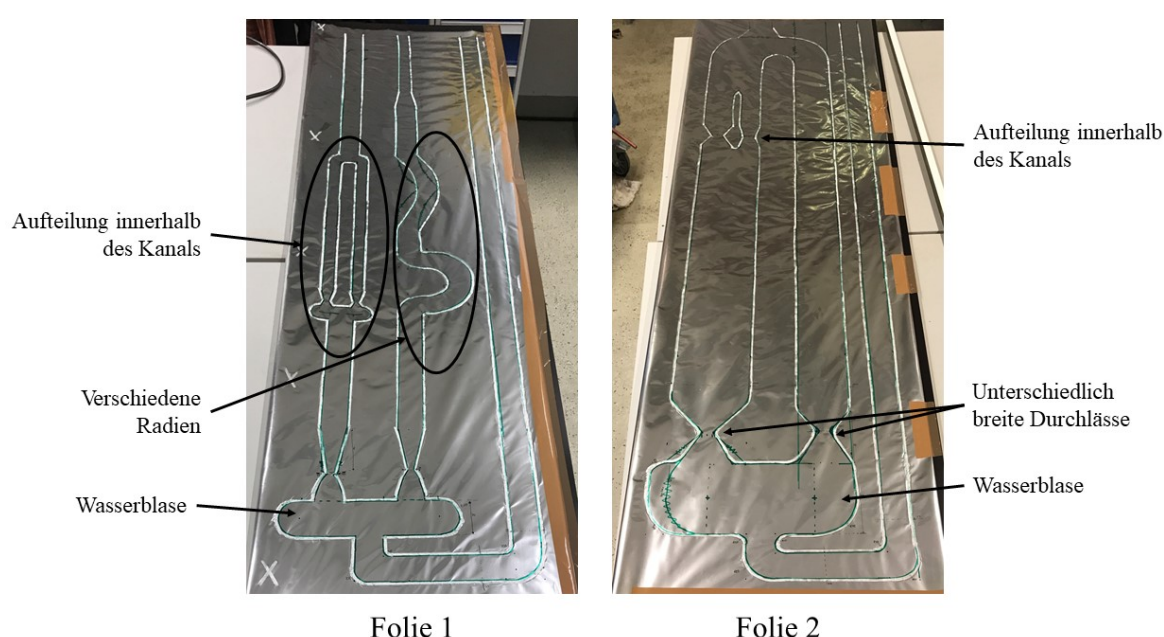
#### 5.1.1. Die erste und zweite Folie

Bei der ersten Anfertigung liegt der Testfokus auf der Anfertigung verschiedener Geometrien mit dem Handfolienroller. Alle Kanäle weisen die gleiche Breite von 50 mm auf. In den Anzuchtkanälen sind verschiedene Kurvenverläufe eingearbeitet, dadurch können verschiedenen Radien



in dem Schweißnahtverlauf getestet werden. Außerdem ist im Kanal 2 eine Aufspaltung und Zusammenführung des Verlaufs integriert, womit das Funktionsprinzip der gesamten Kanalordnung in einem kleineren Maßstab beobachtet werden kann. Es wird festgestellt, dass 25 mm Radien problemlos zu fertigen sind. Sind die geplanten Radien geringer, muss mit großer Sorgfalt gearbeitet werden. Radien unter 10 mm sind zu vermeiden, hier müssen andere Geometrien gewählt werden. Bei der Befüllung mit Wasser wird festgestellt, dass Ecken in den Schweißnähten nicht geeignet sind, weil sich die Folie in diesen Bereichen stark verzieht.

Im Vergleich mit der ersten Folie ist die Wasserblase in Folie 2 breiter gestaltet. Die Kanäle besitzen unterschiedliche Breiten bei einer gleichen Einlassgeometrie. Dadurch kann die Ausdehnung der Folie im Wasserbetrieb beurteilt werden. In Abbildung 5.1 sind die erste und die zweite Folie mit den geschweißten Kanälen und den unterschiedlichen Geometrien zu sehen.



**Abb. 5.1.:** Die erste und zweite angefertigte Folie. Zu erkennen sind die geschweißten Kanäle und die unterschiedlichen getesteten Geometrien.

Die breitere Wasserblase soll beibehalten werden. Hier wird eine vorteilhaftere Ausbreitung der Flüssigkeit beobachtet, wodurch der Eintritt in die Kanäle gleichmäßiger stattfindet.

In Abbildung 5.1 ist ebenfalls die Befestigung der Folien auf der Unterlage mit Klebeband zu sehen. Dies dient zur Fixierung der beiden Folienlagen direkt übereinander, wodurch unerwünschtes Verrutschen vermieden wird.

### 5.1.2. Die Folie 3a und 3b

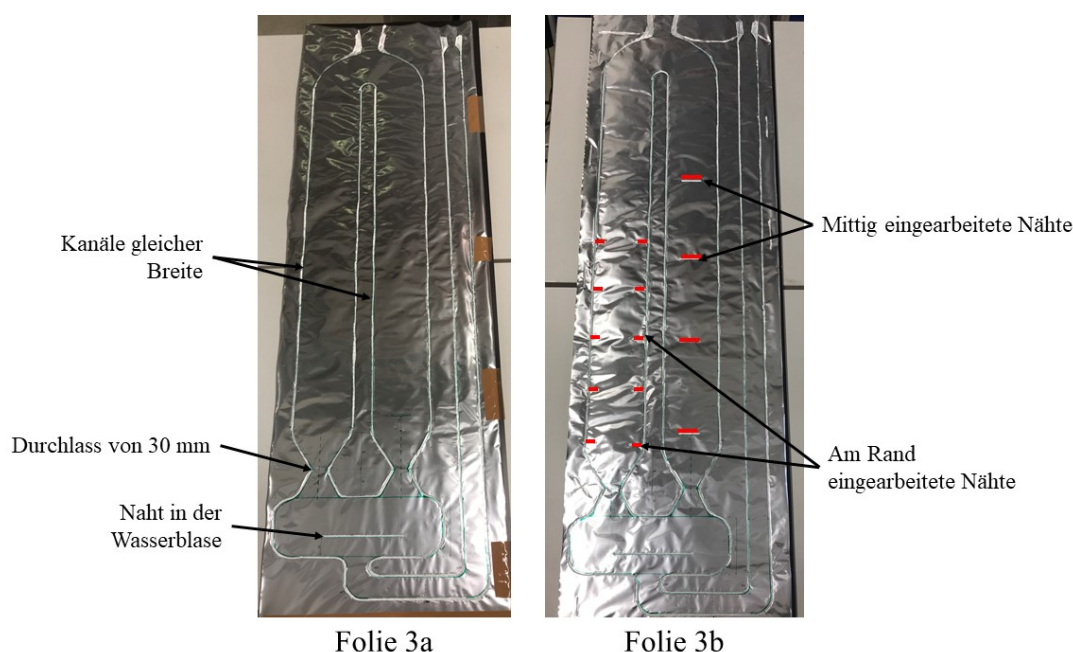
Die dritte Folienanfertigung weist zwei gleich breite Kanäle auf, die beide symmetrisch von der Wasserblase abgehen. In der Wasserblase wird eine Naht eingearbeitet, welche in Abschnitt 4.2.1 beschrieben ist. Sie soll der gleichmäßigeren Verteilung innerhalb des Wasserreservoirs dienen,



bevor die Flüssigkeit in die Kanäle eintritt. Die Funktion der Naht in dieser Testfolie kann als positiv bewertet werden, da sich das Wasser wie gewünscht verteilt. Bei einer Anordnung von mehreren Kanälen muss die Naht jedoch erneut evaluiert werden. Bei nur zwei Kanälen wird die Naht in den weiteren Folien nicht eingearbeitet, weil die Verteilung der Flüssigkeit unabhängig von der Naht problemlos erfolgt.

In dem Layout der Folie 3a wird auch die Ausbreitung der Flüssigkeit von der Wasserblase in die Kanäle durch die Verengung betrachtet. Die schmalste Stelle beträgt dort 30 mm. In einigen Testdurchläufen des Wasserkreislaufs ist die Flüssigkeit nicht ohne manuelles Verteilen in den Kanal eingetreten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Verjüngung im folgenden Layout breiter zu gestalten ist.

Die von der Folie 3a weiterentwickelte Folie 3b weist in den Kanälen 1 und 2 zusätzliche Nähte auf, welche den Flüssigkeitsstrom regulieren sollen. Die beiden Ausarbeitungen der Folie 3 sind in der Abbildung 5.2 zu sehen. In Kanal 1 der Folie 3b befinden sich vier mittige Nähte, im Kanal 2 befinden sich zusätzliche Nähte am Rand. Diese sind zur besseren Visualisierung in rot dargestellt.



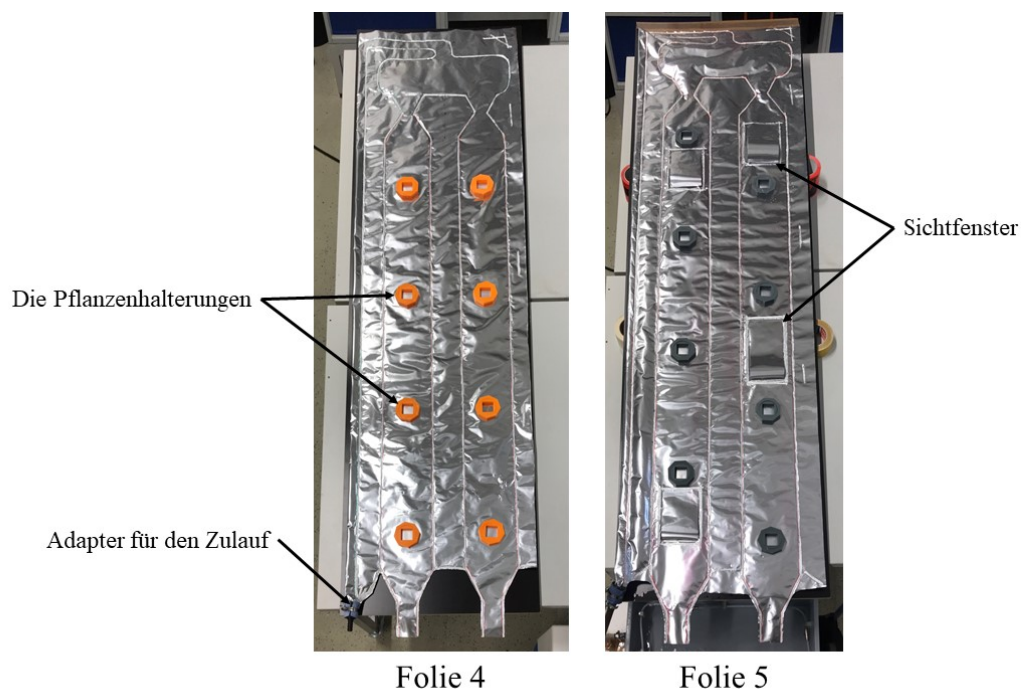
**Abb. 5.2.:** Die Folie 3 - Erste Anfertigung 3a und die Weiterentwicklung 3b. Hier werden eine Naht in der Wasserblase und verschiedene eingearbeitete Hindernisse in den Kanälen getestet.

Mit Hilfe dieser Kanäle soll die Ausbreitung der Flüssigkeit im gesamten Kanal gewährleistet werden, sodass trockene Stellen vermieden werden. Beide Nahtanordnungen funktionieren in dieser Hinsicht einwandfrei, die mittigen Nähte werden im direkten Vergleich besser beurteilt als die Nähte am Rand.

Da in den nächsten Folien die Pflanzenhalterungen ebenfalls mittig eingearbeitet werden und ein Hindernis für die Strömung darstellen, wird in diesen weiteren Folien auf die zusätzliche Nahtbringung verzichtet.

### 5.1.3. Die vierte und fünfte Folie

In der Abbildung 5.3 sind die Folien vier und fünf abgebildet. In beiden Varianten ist die Einarbeitung der Pflanzenhalterungen zu erkennen. Auf der fünften Folie sind außerdem die eingebrachten Sichtfenster zu sehen, auf welche später in diesem Abschnitt weiter eingegangen wird. Der Folienschlauch wird aus einer großen, gefalteten Folie hergestellt. Die Zuleitung der Flüssigkeit erfolgt durch einen Kanal, welcher in dem Knick dieser gefalteten Folie platziert wird. Dadurch wird nur eine zusätzliche Naht in der Folie benötigt. Somit wird die Wahrscheinlichkeit von fehlerhaften Nähten verringert und die Fertigungszeit reduziert.



**Abb. 5.3.:** Die vierte und fünfte Folie. Links sind die Pflanzenhalterungen in orange und rechts in grau zu sehen. Auch die eingearbeiteten Sichtfenster sind auf Folie 5 sind zu sehen.

Beide Folien haben die gleiche Kanalanordnung und unterscheiden sich lediglich in der Breite des Kanaleingangs und in der Anordnung der Pflanzenhalterungen. Die Gestaltung des Layouts erlaubt der Flüssigkeit eine gleichmäßige Verteilung innerhalb der Kanäle. Die Flüssigkeit tritt außerdem wie gewünscht mit nur geringer Zeitversetzung an beiden Kanalenden aus. Bei Folie vier beträgt der Kanaleinlass 35 mm. Hier wird, wie bei Folie drei, noch kein ausreichender alleiniger Durchfluss der Flüssigkeit ohne manuelles Eingreifen festgestellt. Aus diesem Grund wird in Folie fünf der Durchlass auf 40 mm Breite erweitert. Bei diesem Maß wird eine vollständige und gleichmäßige Verteilung in beide Kanäle beobachtet und es soll für das Layout in der theoretischen Auslegung und der Versuchsfolie übernommen werden.

Die in Folie fünf eingelassenen Sichtfenster sollen ein zukünftiges Beobachten der Pflanzenwurzeln ermöglichen. In dem fünften Layout wird die Herstellung getestet und mit der Füllung von Wasser können die Sichtfenster auf ihre Dichtigkeit überprüft werden. Da diese keinen Flüs-

sigkeitsaustritt aufweisen, sollen die Fenster ebenfalls in den Folien zum Versuch eingearbeitet werden.

Die Kanäle 1 und 2 sind in beiden Foliendesigns nicht zusammengeführt. Dadurch sind weiterführende Tests zu den Durchflussraten möglich, welche in Abschnitt 5.2 beschrieben werden.

## 5.2. Durchfluss-Test

Mit dem vierten und fünften Layout werden Tests zu der Durchflussrate durchgeführt. Diese dienen dem Zweck, die Verteilung der Wassermengen in beiden Kanälen zu überprüfen. Es wird eine möglichst gleichmäßige Verteilung angestrebt, damit die in den Kanälen positionierten Pflanzen die Nährlösung zu gleichen Anteilen aufnehmen können.

Der Volumenstrom in den Kanälen kann mit Hilfe einer Stoppuhr und eines Messbehälters bestimmt werden. Dazu wird der Wasserkreislauf eingeschaltet und der Messbehälter unter einen Kanalauslass gestellt. Es wird die Menge an Wasser gemessen, welche innerhalb einer Minute aus einem Kanal ausströmt. Dieser Vorgang wird pro Kanal dreimal wiederholt. Aus diesen drei Werten kann anschließend das Mittel gebildet und der prozentuale Anteil am gesamten Volumenstrom berechnet werden. Die gemessenen Ergebnisse sind in Tabelle 5.1 aufgelistet.

**Tab. 5.1.:** Messwerte im Durchlaufftest für die Folie 4 und 5. Mit einem Messbecher wird in jedem Kanal die durchfließende Flüssigkeitsmenge in einer Minute gemessen. Mit dem Mittelwert kann der prozentuale Anteil am Gesamtvolumenstrom in der Matte berechnet werden.

Folie 4		Folie 5	
Kanal 1 [l/min]	Kanal 2 [l/min]	Kanal 1 [l/min]	Kanal 2 [l/min]
1,6	1,25	1,42	1,23
1,55	1,25	1,41	1,21
1,6	1,2	1,39	1,23
Mittel: 1,58	Mittel: 1,23	Mittel: 1,41	Mittel: 1,22
Anteil: 56 %	Anteil: 44 %	Anteil: 54 %	Anteil: 46 %

Bei Folie 4 beträgt der durch beide Kanäle fließende Volumenstrom 2,81 l/min, wobei 56% des Volumens durch Kanal 1 und 44% durch Kanal 2 strömen. In Folie 5 beträgt der Anteil am Volumenstrom von 2,63 l/min für den ersten Kanal 54% und für den zweiten Kanal 46%.

Die Abweichung vom Idealwert von 50% Volumenstromanteil in beiden Kanälen einer Matte ist bei Folie 4 größer als bei Folie 5 und beträgt 6%. Diese Abweichung kann als vernachlässigbar angesehen und die Verteilung der Durchflussmenge in beiden Kanälen somit als gleichmäßig bewertet werden.

Das Layout dieser beiden Folien mit ihren Maßen wird als Vorlage für die Saatgut-Matte dienen, die im Versuch verwendet werden soll.

## 6. Der Versuch

Dieses Kapitel beschreibt den Versuchsaufbau zur Überprüfung der theoretisch ausgelegten SCM. Um das Funktionsprinzip der SCM zu verifizieren, wird ein Modell des Folienschlauchs angefertigt und anschließend im Labor getestet. Das Modell dient dazu, das entworfene Layout der Kanäle mit dem ausgewählten Material und den entwickelten Schnittstellen zu überprüfen. Im Folgenden werden das Ziel und der Aufbau des Versuchs beschrieben. Dazu gehören die Herstellung des Folienschlauchs und der Laboraufbau inklusive des Wasserkreislaufs und der Einstellungen der Lampen.

### 6.1. Ziel des Versuchs

Ziel des Versuchs ist es zu überprüfen, ob die NFT als Bewässerungsmethode für das MEPA-System eine geeignete Lösung zum Anbau von Pflanzen darstellt. Dazu wurde zu Beginn der theoretischen Auslegung ein Kanallayout für die SCM entwickelt, an welcher sich die Auslegung der Saatgut-Matte im Versuch orientieren soll.

Der Versuch wird aus kapazitiven Gründen eine kleinere Variante der SCM behandeln. Dazu wird die entworfene Kanalanordnung auf eine kleinere SCM übertragen. Diese soll, wie das in der Theorie ausgelegte Modell, das benötigte Pflanzeninterface beinhalten.

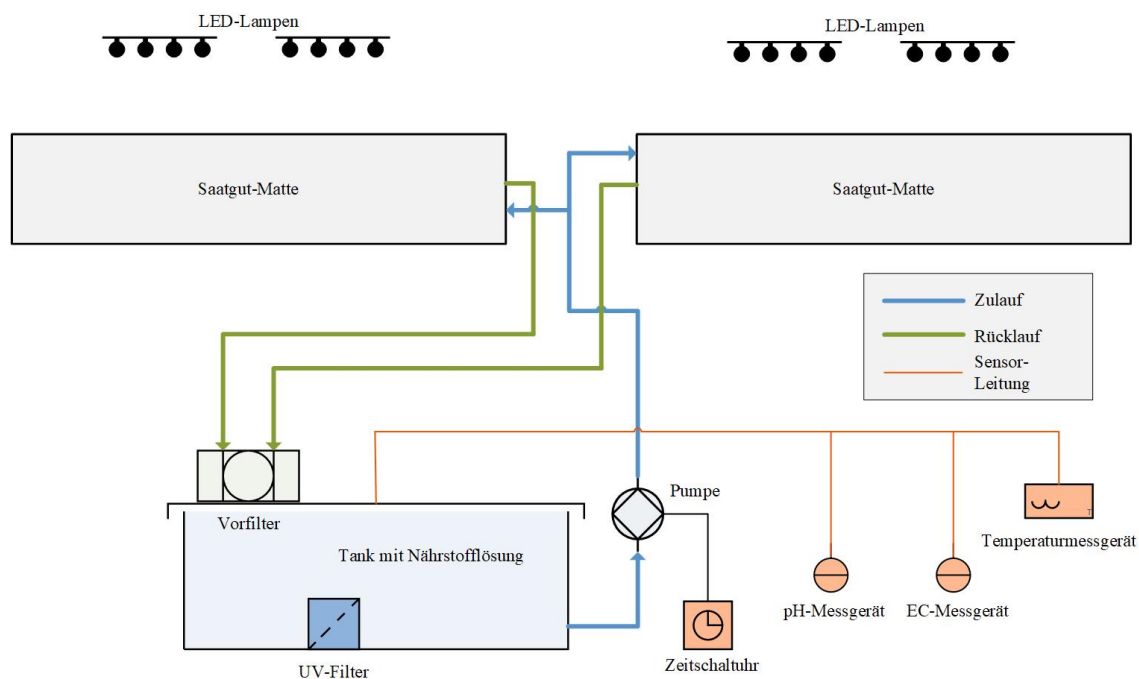
Mit dem Versuch soll bewiesen werden, dass es möglich ist, mit Hilfe der entwickelten Saatgut-Matte eine Kultur von Salatpflanzen heranzuziehen. Dabei ist die Umsetzung einer gleichmäßigen Verteilung der Nährlösung mit Hilfe des Folienschlauchs nötig. Es soll überprüft werden, ob die Folienkanäle mit den gewählten Dimensionen für die Anzucht dieser Pflanzen geeignet sind. Außerdem wird das gewählte Folienmaterial in diesem Test auf seine Haltbarkeit beobachtet werden können.

Über einen Zeitraum von 28 Tagen sollen die Salatpflanzen innerhalb der Saatgut-Matte eine möglichst große Biomasse erreichen. Dieser Zeitraum wird in verschiedenen anderen hydroponischen Versuchen zu Salat ebenfalls verwendet und soll ausreichend sein, um ein erntefähiges Stadium der Pflanze zu erreichen [13, 23].

### 6.2. Versuchsaufbau

Bevor der Aufbau im Labor stattfinden kann, wird ein Aufbauschema benötigt, welches alle wesentlichen Komponenten enthält. Anhand dieses Schemas orientiert sich der eigentliche Laboraufbau. In der Abbildung 6.1 ist dieser geplante Aufbau zu erkennen. An den beiden Saatgut-Matten ist jeweils ein Zu- und ein Rücklauf angeschlossen. Über den Matten sind insgesamt vier LED-Lampen für die Pflanzen montiert. Von dem Nährlösungstank, in welchem

sich ein UV-Filter befindet, wird die Flüssigkeit mit Hilfe einer Pumpe in die Matte gefördert. Die Pumpe wird mit einer Zeitschaltuhr gesteuert. Bevor die Nährlösung wieder in den Tank fließt, wird sie durch den Vorfilter gereinigt. An dem Tank sind Messgeräte zur Überprüfung der Temperatur, des EC- und pH-Wertes von der Nährlösung angeschlossen. Die Eigenschaften der verwendeten Komponenten werden in Abschnitt 6.3 detailliert beschrieben.



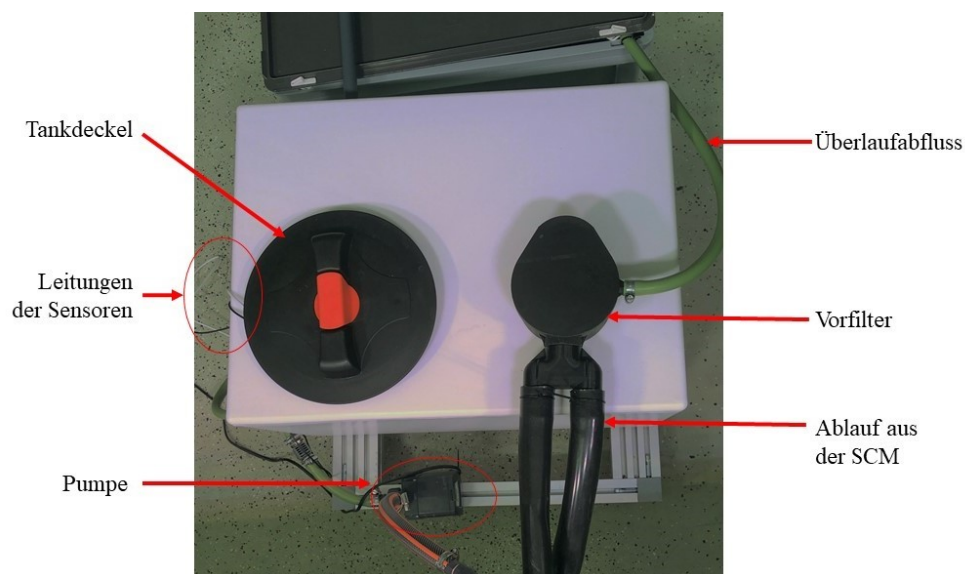
**Abb. 6.1.:** Schematische Darstellung des geplanten Versuchsaufbaus mit allen wesentlichen Komponenten. Die Saatgut-Matten sind mit dem Nährlösungstank über den Zu- und Rücklauf verbunden. An den Nährlösungstank sind die Messgeräte für den pH- und EC-Wert sowie für die Temperatur angeschlossen. In den Nährlösungskreislauf sind der Vorfilter und die Pumpe integriert. Die Pumpe ist direkt an eine Zeitschaltuhr angeschlossen. Über den einzelnen Saatgut-Matten sind jeweils zwei LED-Lampen positioniert.

Der im Labor aufgebaute Versuch ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Die Saatgut-Matten sind auf den hölzernen Auflageflächen befestigt, um ungewolltes Rutschen zu vermeiden. Über jeder Saatgut-Matte sind jeweils zwei LED-Lampen angebracht. Außerdem sind in der Abbildung die Schläuche zu sehen, welche zu dem Nährlösungstank führen.



**Abb. 6.2.:** Ansicht des Laboraufbaus mit den Saatgut-Matten, der Beleuchtung und den Verbindungsschläuchen

In der Abbildung 6.3 sind der Nährlösungstank, die Pumpe sowie der Vorfilter zu sehen. Der Tank steht auf einem Sockel aus ITEM-Profilen, auf welchen ebenfalls die Pumpe befestigt ist, damit diese während des Testzeitraums nicht verrutscht. Die Sensoren des EC- und pH-Messgeräts sind in den Nährlösungstank eingehängt. Der Deckel liegt locker auf der Öffnung auf, um die Kabel der Sensoren nicht zu beschädigen und kaum Licht durchzulassen. Auf dem Tank ist der Vorfilter fest montiert und mit den Rücklauf-Schläuchen verbunden. Hinter dem Nährlösungstank ist ein weiterer Behälter zu erkennen, welcher eventuelle Flüssigkeit aus dem Überlauf des Vorfilters auffangen kann.



**Abb. 6.3.:** Der Laboraufbau des Nährlösungstanks mit der Pumpe und dem Vorfilter. Unter dem Deckel ist die Öffnung, in welcher die Sensoren der Messgeräte positioniert sind. Ebenfalls zu erkennen ist der Schlauch für den Überlauf, welcher in das Überlaufbecken führt.



In dem Versuch wird die NFT-Bewässerung angewendet, weshalb eine Schräglage der Saatgut-Matten erforderlich ist. Diese ermöglicht das vollständige Ablaufen der Flüssigkeit aus den Matten und soll zwischen 0,3% und 5% liegen (Tabelle 3.1). Für den Versuch wird ein Mittelwert von 2,5% für die Schräglage ausgewählt, dies entspricht ungefähr einem Winkel von 1,4 Grad. Anhand dieses Wertes kann die Holzplatte, welche als Unterlage für die Matte dient, im Laboraufbau ausgerichtet werden. In der Abbildung 6.4 ist die linke Seite des Versuchsaufbaus mit der eingezeichneten Schräglage der Saatgut-Matte zu sehen.



**Abb. 6.4.:** Die Positionierung der Saatgut-Matte in der Winkelposition: Eine der im Laboraufbau verwendeten Saatgut-Matten auf der Unterlage in dem ausgewählten Winkel mit 2,5% Steigung positioniert.

## 6.3. Komponenten des Versuchs

Bevor mit dem Versuch begonnen wird, müssen die einzelnen Komponenten zunächst ausgewählt oder hergestellt werden. Dazu bietet es sich an, die Bestandteile des Versuchs in Gruppen zu kategorisieren:

- der Folienschlauch
- der Wasserkreislauf
- Licht und Temperatur
- Sensoren und Messgeräte

Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben diese Gruppierungen. Dazu werden jeweils die benötigten Hintergrundinformationen geliefert, notwendige Berechnungen durchgeführt und die Komponenten dargestellt.

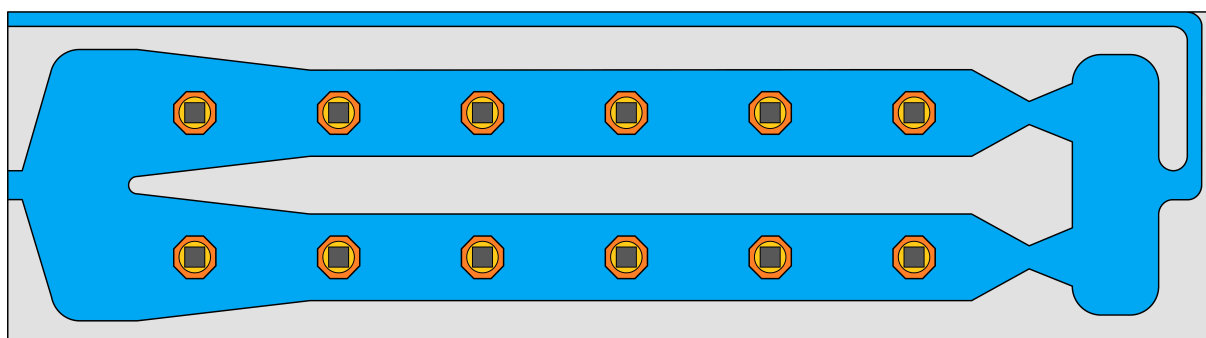
### 6.3.1. Folienschlauch

Der Folienschlauch wird, wie in Kapitel 4 beschrieben, aus einer mit Aluminium beschichteten Kunststoffolie gefertigt. Da es sich um eine kleinere Variante der SCM handelt, muss das Layout auf die zur Verfügung stehende Größen angepasst werden. In dem Labor werden die bereits

bestehenden Metallgerüste von früheren Versuchen wiederverwendet. Als Unterlage für die SCM dienen beschichtete Holzplatten mit 2,1 m Länge und 55 cm Breite, welche in dem Gerüst platziert werden. Auf Grundlage dieser Maße wird die SCM angefertigt.

### Kanalordnung des Modells

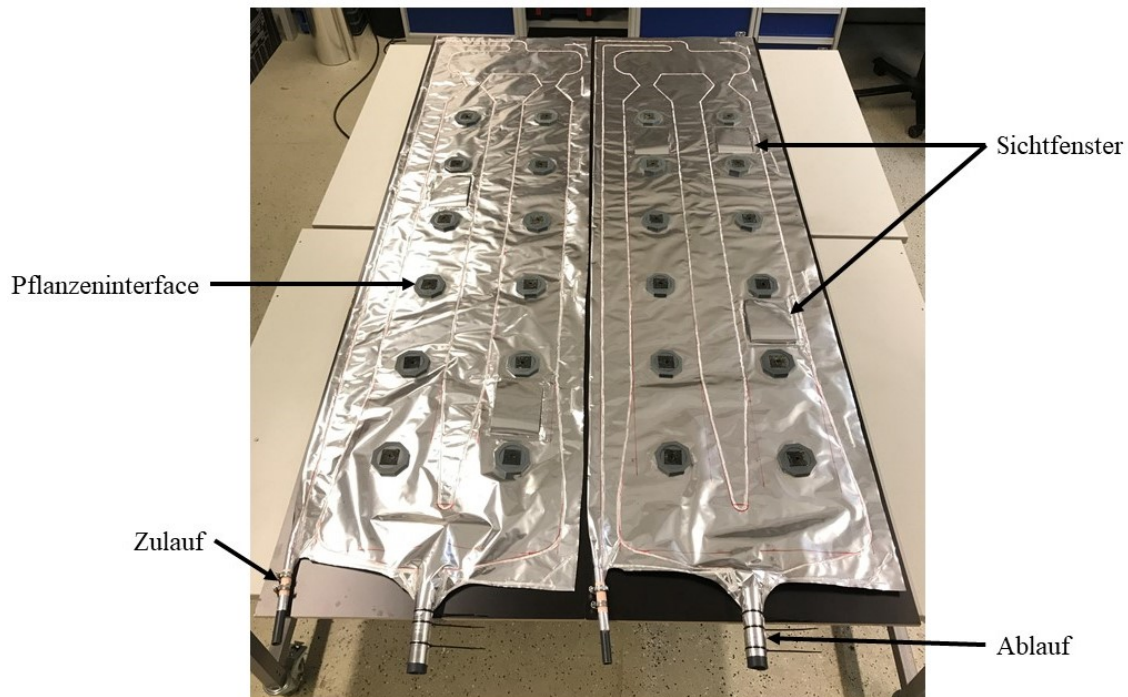
Anhand dieser Maße können ein Zuleitungskanal und zwei Kanäle zur Aufnahme von Pflanzen integriert werden. Des Weiteren soll die gleichmäßige Verteilung der Nährlösung durch die folieninterne Wasserblase erprobt werden. Am unteren Ende der Folie werden die Kanäle wieder zusammengeführt, sodass ein Abfluss aus der Folie führt. In den Kanälen werden die Pflanzenhalterungen positioniert. Die Abstände der Halterungen zueinander sind auf den benötigten Platz von Salatpflanzen abgestimmt. In Abbildung 6.5 ist die erstellte Anordnung abgebildet. Die Kanäle für den Nährstofftransport sind in blau dargestellt, die Pflanzenhalterungen in orange und gelb. Im Anhang A ist eine Zeichnung mit den genauen Maßen der erstellten Saatgut-Matte zu finden sowie eine Abbildung mit der Positionierung der Pflanzenhalterungen.



**Abb. 6.5.:** Die gewählte Kanalordnung für die Modell-SCM. Die Anordnung ist nach der Vorlage der theoretisch ausgelegten Saatgut-Matte ausgewählt, sodass zwei Anzuchtkanäle eingearbeitet werden können. Insgesamt sind auf dieser Matte 12 Pflanzenhalterungen positioniert.

Wie in den Vorversuchen in Kapitel 6 beschrieben, werden auch die zwei Saatgut-Matten für den Versuch gefertigt. Diese haben in den Kanälen eingearbeitete Sichtfenster, welche es erlauben, während des Versuchs den Nährstoff-Film und das Geschehen im Inneren des Kanals zu beobachten. Anstelle der Adapter werden einfache Kunststoffröhren als Verbindung zu den Schläuchen genutzt. Dies geschieht aus dem Grund, dass mit den Adaptern noch keine ausreichenden Tests durchgeführt wurden und somit keine genügend abdichtenden Verbindungsstellen gewährleistet werden können. Zwischen den Kunststoffröhren und der Folie wird ein Teflonband zur Abdichtung eingesetzt. Die Verbindungsstelle wird anschließend mit Rohrschellen fixiert. Die fertiggestellten Saatgut-Matten sind in Abbildung 6.6 zu sehen. Zu erkennen sind die Pflanzeninterfaces und die Sichtfenster.





**Abb. 6.6.:** Die zwei gefertigten Saatgut-Matten für den Versuch im Labor. In beide sind Sichtfenster eingearbeitet und jeweils zwölf Pflanzenhalterungen integriert. Zu- und Rücklauf beinhalten Kunststoff-Rohre, welche als Schlauchaufnahme dienen.

### 6.3.2. Wasserkreislauf

Um den erfolgreichen Transport der Nährlösung zu den Pflanzen zu gewährleisten, ist der Wasserkreislauf das zentrale Element. Hier finden verschiedene Komponenten Anwendung, welche alle miteinander verbunden werden und keine Undichtigkeiten aufweisen dürfen. Zu den Komponenten zählen der bereits beschriebene Folienschlauch, die Verbindungsschläuche, die Pumpe und der Wassertank sowie das Filtersystem. Diese sind in den folgenden Abschnitten erläutert.

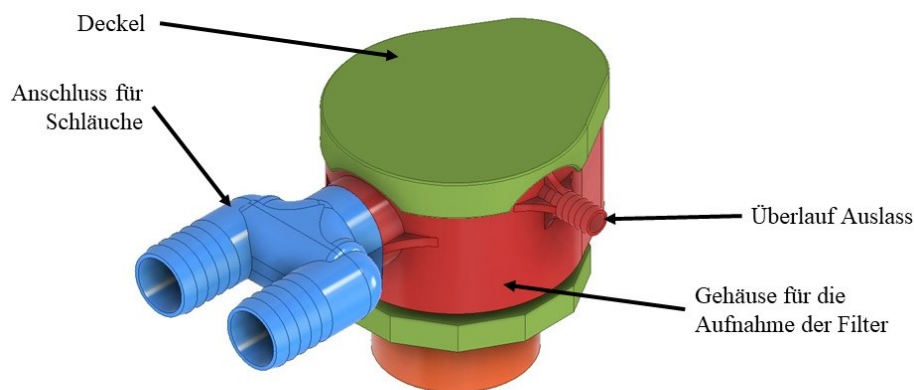
#### Die Pumpe

Die im Wasserkreislauf verwendete Pumpe ist die Aquariumpumpe *compact 3000+* von der Firma *EHEIM*. Diese Pumpe weist ein Fördervolumen von 1500 l/h bis maximal 3000 l/h auf. Diese Menge ist stufenlos mit Hilfe eines Drehreglers einstellbar. Sie kann sowohl als Tauchpumpe, als auch außerhalb des Fördermediums betrieben werden, wie es in diesem Versuchsaufbau der Fall ist.

#### Das Filtersystem

Im Wasserkreislauf werden zwei Filtersysteme eingesetzt. Eins dient dazu, das aus der Saatgut-Matte zurückströmende Wasser vor dem Eintritt in den Nährlösungstank von groben Verunreinigungen zu befreien. Dazu wurde bereits im Vorfeld dieser Arbeit im Rahmen eines Praktikums ein Filtersystem entwickelt, welches in der Abbildung 6.7 als CAD-Darstellung zu sehen ist.

Dieses System wird auf dem Tank angebracht und kann durch das Herausnehmen der beiden Filterstufen gereinigt werden. An das Filtergehäuse selbst können verschiedene Anschlüsse angebracht werden. [21]



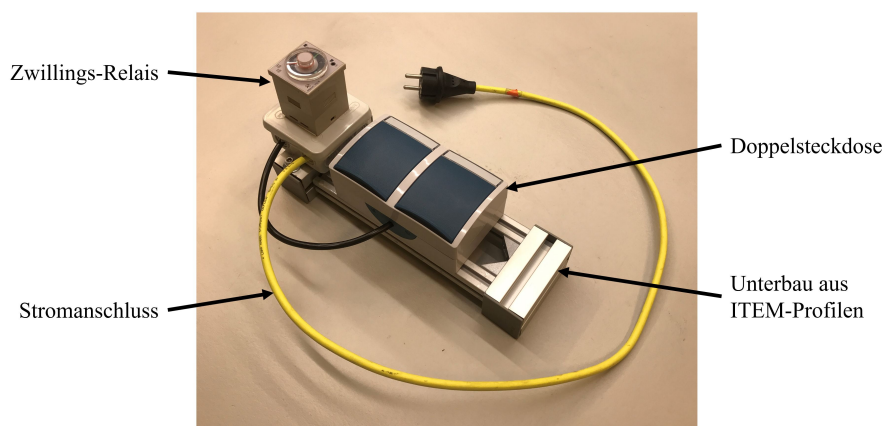
**Abb. 6.7.:** Der Filter für den Rückstrom als CAD Darstellung. Durch die Darstellung in verschiedenen Farben sind die einzelnen Komponenten des Vorfilters gut voneinander zu unterscheiden. In dem Gehäuse befinden sich die beiden Filtereinsätze.

Der zweite Filter ist ein UV-Filter, welcher sich direkt im Tank befindet. Der von der Firma *AQUAEL* stammende UniFilter UV Power dient zum Reinigen und Belüften des Wassers. Mit dem Gerät werden im Wasser befindliche Algen, Bakterien und andere krankheitserregende Organismen abgetötet. Dies hilft dabei, die sich in der Saatgut-Matte befindlichen Pflanzen gesund zu erhalten.

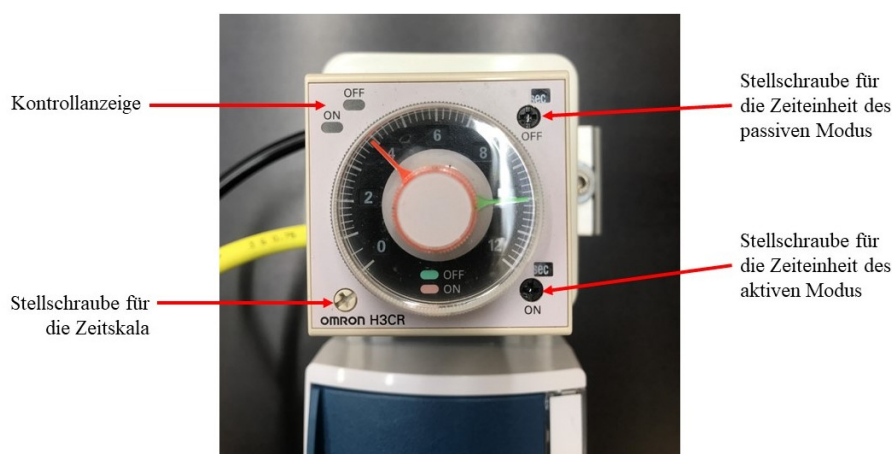
### Die Zeitschaltuhr

Um die Pumpe in den gewünschten Intervallen starten zu können, wird eine Zeitschaltuhr benötigt. Für den Versuch wird dafür eine Zeitschaltuhr, bestehend aus einer Doppelsteckdose und einem Zeitrelais, angefertigt. Diese ist in Abbildung 6.8 zu erkennen. Damit wird das Einstellen von regelmäßigen Trocken- und Bewässerungszeiten ermöglicht.

Das Zeitrelais ermöglicht es, die aktiven und passiven Zeiten unabhängig voneinander einzustellen, sodass individuelle Konfigurationen möglich sind [24]. In Abbildung 6.9 ist dieses Zeitrelais dargestellt. Zu erkennen sind die beiden Zeiger in rot und grün, welche auf einer wählbaren Skala einstellbar sind. Der rote Zeiger gibt das aktive und der grüne Zeiger das passive Zeitintervall vor. Für den aktiven und passiven Modus kann jeweils die Zeiteinheit gewählt werden, welche für den ausgewählte Skalenwert gelten soll.



**Abb. 6.8.:** Die für den Versuch zusammengebaute Zeitschaltuhr. Auf der Darstellung sind das Relais, eine Steckdose und eine Basis aus ITEM-Profilen zu sehen, welche zusammen die gesamte Zeitschaltuhr bilden.



**Abb. 6.9.:** Detailansicht auf das Zwilling-Zeitrelais H3CR. Zu erkennen sind die Skala und die verstellbaren Zeiger für das aktive und passive Zeitintervall sowie die Schrauben zur Einstellung der Zeiteinheit.

## Die Schläuche

Die Saatgut-Matte muss mit dem Nährlösungstank verbunden werden. Ein Schlauch ist für den Zulauf aus dem Tank in die Matte vorgesehen und einer für den Rücklauf der Nährlösung aus der Matte in den Nährlösungstank. In beiden Fällen werden lichtundurchlässige Silikonschläuche verwendet. Diese flexiblen Schläuche sind lebensmittelecht, temperaturbeständig und resistent gegenüber UV-Strahlung sowie Chemikalien.

Die Nährlösung wird zunächst aus dem Tank durch die Pumpe geleitet und dadurch in die Saatgut-Matte befördert. Diese Leitung hat einen Innendurchmesser von 13 mm. Die zurückströmende Flüssigkeit wird aufgrund der Schwerkraft durch einen Schlauch mit etwa 32 mm Innendurchmesser geleitet. Wie bereits in Abschnitt 4.4.2 beschrieben, ist der Schlauch für den Rückfluss gezielt breiter ausgewählt, um ein Verstopfen durch Pflanzenverunreinigungen zu vermeiden. Aus diesem Grund hat der Filter für den Rückstrom für diese Schlauchgröße speziell gestaltete Anschlüsse.

### Der Wassertank

Der Wassertank dient zur Aufnahme der Nährlösung, wie er in der ASU ebenfalls geplant ist. Schwankungen in dem Nährstoffgehalt, dem pH-Wert und der Temperatur der Flüssigkeit werden durch ein zunehmendes Volumen verringert. Der ausgewählte Tank hat deshalb ein Fassungsvermögen von 75 Litern. Um zusätzlich das Algenwachstum zu hemmen, ist der Tank lichtundurchlässig. Der Tank aus Polyethylen mittlerer Dichte (Medium Density Polyethylen, MDPE) hat eine Reinigungsöffnung von 20 cm Durchmesser mit einem verschraubbaren Deckel sowie einen Auslass mit einer Messing-Gewindemuffe. Zu sehen ist der Tank in der Abbildung 6.3 in Abschnitt 6.2.

### 6.3.3. Lampen

Die im Versuch verwendeten Lampen sind von der Firma *Heliospectra*. Das Modell LX60 ist eine programmierbare LED-Lichtquelle, welche für Gewächshäuser, Indoor-Farms und verschiedene andere künstliche Wachstumsumgebungen verwendet wird. Das Modell ist in der Abbildung 6.10 zu sehen.

Mit Hilfe eines Netzwerkrouters werden die Lampen über die Firmensoftware angesteuert. Die gewünschte Lichtintensität kann durch eine Regulierung der Wellenlängen erreicht werden. Dies geschieht durch vier einstellbare Kanäle mit Wellenlängen von 450 nm, 660 nm und 735 nm sowie einem Kanal für die Farbtemperatur von 5700 K. Alle Kanäle können mit Werten auf einer Skala von 0 bis 1000 eingestellt werden, diese entsprechen 0% bis 100% der maximalen LED-Leistung. Es ist möglich, zu verschiedenen Tageszeiten unterschiedliche Lichtprogramme ablaufen zu lassen. [25]



**Abb. 6.10.:** Die Lampe Heliospectra LX-60 [25], welche im Versuch insgesamt viermal verwendet wird.

### 6.3.4. Messgeräte

Während des Versuchs werden verschiedene Parameter überwacht, dafür sind spezielle Messgeräte nötig. Um die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit aufzunehmen, werden handelsübliche Geräte verwendet. Um den Temperaturverlauf aufzuzeichnen, wird außerdem ein Datenlogger

verwendet. Zusätzlich wird ein Quantensensor, welcher für die Einstellung der Lampen herangezogen wird, verwendet sowie ein Messgerät zur Überprüfung der Nährlösung und des pH-Werts. Der Quantensensor und das EC- und pH-Messgerät sind in den Abbildungen 6.11 und 6.12 zu sehen. In Anhang C sind die Datenblätter zu diesen Geräten zu finden.



**Abb. 6.11.:** Der Quantensensor mit der dazugehörigen Anzeige [26]



**Abb. 6.12.:** Das Messgerät zur Bestimmung von EC- und pH-Wert [27]

### Der Quantensensor

Der Quantensensor *MQ-200* von der Firma *Apogee Instruments* besteht aus einer Anzeige und dem externen Sensor, welcher den Photonenstrom misst. Angegeben wird die Photonenstromdichte (PPFD) in  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . [26]

### EC- und pH-Messgerät

Das Messgerät, welches zur Überprüfung des Nährstoffgehalts und des pH-Wertes verwendet wird, ist von der Firma *blueLAB*. Es kann den pH- und den EC-Wert einer Lösung messen. Außerdem wird die Temperatur angezeigt. Die Sensoren sind für den dauerhaften Gebrauch innerhalb einer Flüssigkeit ausgelegt. [27]

### Der Datenlogger

Um den Temperaturverlauf in der Laborumgebung aufzuzeichnen, wird ein sogenannter Datenlogger verwendet. Dieser ist von dem Hersteller *EXTECH Instruments* und trägt die Bezeichnung *TH-10*. Der Temperatur-Datenlogger misst die Temperatur und kann bis zu 32.000 Messwerte speichern. Das Gerät kann über eine Firmensoftware bedient werden, wo unter anderem das Aufzeichnungsintervall konfigurierbar ist. Mit dem Programm können im Anschluss des Versuchs die Messwerte vom Gerät auf den PC übertragen und graphisch dargestellt werden. [28]

## 6.4. Versuchsdurchführung

Dieser Abschnitt beschreibt die gewählten Einstellungen zu den eben erläuterten Komponenten und die zu treffenden Vorbereitungen vor Versuchsbeginn. Zunächst werden die Nährlösung und die einzustellenden Parameter wie EC- und pH-Wert erklärt. Die Licht- und Bewässerungseinstellungen werden anschließend in weiteren Unterabschnitten behandelt. Die im Labor durchzuführenden Arbeiten während des Versuchszeitraums werden in den jeweils zugehörigen Abschnitten beschrieben. Außerdem werden die in der Zeit der Versuchskampagne durchgeführten Änderungen am Aufbau dargelegt.

### 6.4.1. Die Nährlösung

Die Nährlösung ist für die Anzucht der Pflanzen essentiell und muss vor dem Versuchsbeginn angesetzt werden. Dazu wird zunächst Wasser mit Hilfe einer Osmoseanlage von allen darin gelösten Mineralien gefiltert. Im Anschluss wird dieses Wasser mit Nährstoffen in Pulverform versetzt und der Säuregehalt mit Hilfe von pH-Regulierern eingestellt. Das Nährstoffpulver enthält bereits alle von den Pflanzen benötigten Elementen und muss lediglich in Wasser gelöst werden.

#### Der EC-Wert

Der EC-Wert einer Lösung gibt an, wie hoch der Salzgehalt der Flüssigkeit ist und wird in mS/cm angegeben. Nährstoffmineralien bestehen aus unterschiedlichen Elementen, welche die Leitfähigkeit der Lösung beeinflussen. Mit Hilfe eines Messgeräts, welches einen Strom zwischen zwei Kontaktflächen fließen lässt, kann der Widerstand und daraus die Leitfähigkeit der Lösung bestimmt werden. Das Wasser, welches mit Hilfe einer Osmosemaschine gefiltert wurde, weist einen EC-Wert von 0 mS/cm auf. Wird es mit dem Nährstoffmix versehen, nimmt die Konzentration an Mineralien im Wasser zu und die Leitfähigkeit steigt. Dadurch ist dieser Wert ein guter Indikator für die Menge an gelösten Nährstoffen in der Lösung.

Die Pflanzen nehmen während ihres Wachstums die Nährstoffe aus der Lösung auf, wodurch der EC-Wert sinkt. Durch einen sinkenden Wassergehalt, verursacht durch Transpiration, kann der EC-Wert steigen. Aufgrund dessen muss der Wert regelmäßig kontrolliert werden und gegebenenfalls durch die Hinzugabe von weiteren Nährstoffen angepasst werden. Die empfohlenen EC-Werte für Salat variieren zwischen 1,15 - 1,25 mS/cm [23], 1,4 mS/cm [29] und 2,5 mS/cm [9]. Ein Wert von  $1,4 \pm 0,1$  mS/cm wird ausgewählt, da mit diesem Wert bereits positive Erfahrungen im EDEN-Labor gemacht wurden.

#### Der pH-Wert

Der pH-Wert gibt an, wie sauer oder basisch ein Stoff oder eine Lösung ist. Auf einer Skala von 0 bis 14 werden die Säuren und Laugen eingeteilt. Bei einem Wert von 7 ist ein Stoff weder sauer noch basisch und wird als neutral bezeichnet. Je weiter der pH-Wert auf dieser Skala von 7 abweicht, desto konzentrierter ist die Säure beziehungsweise die Base. Werte von 0 bis 7 sind



der Kategorie der Säuren zuzuteilen und Werte von 7 bis 14 der der Basen.

Pflanzen benötigen ein leicht saures Milieu um die Wurzeln herum, wobei sich der optimale pH-Wert je nach Art der Pflanze unterscheidet. Dadurch wird die Nährstoffaufnahme über die Wurzeln verbessert. Für Salat liegt der empfohlene pH-Wert bei 5,8. Abweichungen mit Werten zwischen 5,6 bis 6 sind für das Wachstum von Salatpflanzen tolerierbar. [23]

Mit Hilfe von pH-Reglern kann die Nährlösung an den Wert von 5,8 angepasst werden. Um den pH-Wert zu senken, steht eine Salpetersäure ( $HNO_3$ ) mit 38 prozentiger Konzentration zur Verfügung. Zum Erhöhen des Wertes wird eine Kaliumhydroxid-Lauge ( $KOH$ ) mit einer Konzentration von 40% verwendet. Aufgrund des verhältnismäßig geringen Tankvolumens reichen bereits einige Tropfen der beiden Stoffe aus, um den pH-Wert zu ändern.

### **Kalibrierung des Messgeräts**

Das Messgerät für den EC- und den pH-Wert der Nährlösung wird vor dem Gebrauch kalibriert. Da das Gerät bereits in vorherigen Versuchen zum Einsatz kam, reicht es aus, den pH-Wert neu zu kalibrieren. Dazu stehen zwei spezielle Kalibrierungslösungen zur Verfügung. Eine dieser Lösungen hat den pH-Wert von 7,01 und ist somit chemisch neutral. Die zweite Lösung ist je nach Anwendungsfall entweder sauer oder basisch. In diesem Fall ist eine saure Lösung zu erwarten, weil Pflanzen eine leicht säuerliche Umgebung bevorzugen. Aus diesem Grund wird eine saure Kalibrierungslösung mit einem pH-Wert von 4,01 verwendet. Die Kalibrierung erfolgt nach den Anweisungen der Bedienungsanleitung. Danach ist das Gerät einsatzbereit und die Sensoren können in dem Nährlösungstank positioniert werden.

### **6.4.2. Lichteinstellungen**

Der Versuch findet in einer Laborumgebung statt. Aus diesem Grund wird eine Beleuchtung benötigt, welche das Wachstum von Pflanzen ohne natürliches Tageslicht ermöglicht. Das EDEN-Labor ist dafür mit speziellen Lampen ausgestattet. Diese Lampen verwenden LEDs mit verschiedenen Wellenlängen, welche auf die Bedürfnisse der Pflanzen angepasst werden können. Dabei sind die Lichtintensität, der Spektralmix und die Beleuchtungsdauer von Bedeutung.

### **Theorie**

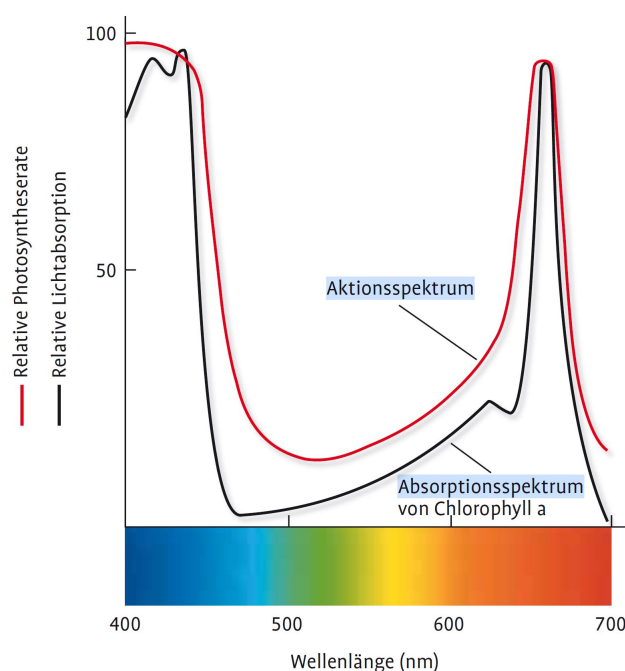
Pflanzen benötigen Licht, um zu wachsen. Dafür wird Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt, dieser Prozess heißt Fotosynthese. Es wird atmosphärisch und wassergebundenes  $CO_2$  organisch gebunden und somit wird körperfremde in körpereigene Substanz überführt. [30]

Für die Fotosynthese nutzen Pflanzen die Lichtstrahlen aus dem Spektrum von 380 nm bis 720 nm. Dieses Spektrum wird als fotosynthetisch aktive Strahlung (Photosynthetically Active Radiation, PAR) bezeichnet. [31]

Die Lichtstrahlung setzt sich je nach Wellenlänge aus Photonen mit unterschiedlicher Energie zusammen. Photonen mit kürzeren Wellenlängen sind energiereicher als diejenigen mit längeren Wellenlängen. Beim Messen dieser Photonen mit einem Spektralsensor werden die energie-

reicheren kurzwelligen Photonen stärker gewichtet. Um die Anzahl der Photonen gleichwertig zu registrieren, werden Photosensoren mit speziellen Filtern verwendet. Damit kann die sogenannte Photonenstromdichte (Photosynthetically Active Photon Flux Density, PPFD) gemessen und somit die Lichtintensität bestimmt werden. Angegeben wird die Photonenstromdichte in  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ . [31] Geräte, welche die PPFD messen können, werden als Quantensensoren bezeichnet.

Pflanzen nutzen bei der Fotosynthese die Strahlung in dem PAR-Spektrum nicht gleichmäßig aus. Das heißt, dass sich bestimmte Wellenlängenbereiche besser für die Fotosynthese eignen. In Abbildung 6.13 ist dieses Aktionsspektrum der Fotosynthese dargestellt, auf welchem zu erkennen ist, dass bei blauer und roter Strahlung ein Maximum vorliegt. An diesen Stellen wird die Strahlung besonders für die Fotosynthese herangezogen, wohingegen der Bereich der grünen Wellenlängen eine geringere Bedeutung für diesen Prozess hat. Das Aktionsspektrum deckt sich mit dem Absorptionsspektrum des *Chlorophyll a*, welches wesentlich an dem Prozess der Fotosynthese beteiligt ist. Dieses Absorptionsspektrum ist außerdem eine Erklärung für die grüne Farbe von Pflanzen. [30]



**Abb. 6.13.:** Das Absorptionsspektrum von Chlorophyll a und das Aktionsspektrum des Lichts bei der Fotosynthese. Der Verlauf der Absorptionsrate und der Fotosyntheserate weisen den gleichen Verlauf mit spitzen im blauen und roten Wellenlängenbereich auf. [30]

Aus dem Grund, dass die Fotosynthese bei blauem und rotem Licht besonders aktiv ist, werden bei den Lampen in der Pflanzenzucht hauptsächlich diese Farbspektren eingesetzt. Es konnten bei unterschiedlichen Lichtintensitäten und einer Änderung der Blau- und Rotanteile verschiedene Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum und die Zusammensetzung der Pflanzen beobachtet werden. [32]

Für Salat gibt es bereits vielfältige Forschungsergebnisse für die Zucht unter kontrollierten Umweltbedingungen. Die Faktoren Lichtintensität, Lichtqualität und Photoperiode (Beleuchtungs-



dauer) beeinflussen sich gegenseitig, sodass eine Generalisierung der idealen Einstellungen nicht getroffen werden kann. Allgemein lässt sich jedoch sagen, dass für Salatpflanzen die Lichtintensität nicht unter  $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  fallen darf, um ein Wachstum zu ermöglichen [23]. Außerdem darf die tägliche Photonenmenge einen Wert von  $17 \text{ mol}/\text{m}^2/\text{d}$  nicht überschreiten, um ein Verbrennen der Blattspitzen zu verhindern. [14]

### Getroffene Einstellungen

Das Lichtprogramm für diesen Versuchsablauf wird simpel gestaltet und richtet sich nach den Anforderungen von den ausgewählten Salatpflanzen. Bei den im Versuchsaufbau verwendeten vier Lampen muss auf eine gleichmäßige Einstellung der Lichtintensität geachtet werden. Mit Hilfe eines Quantensensors, welcher auf den Bereich der PAR reagiert, kann die gewünschte Intensität überprüft werden. Um ein korrektes Ergebnis zu erzielen, muss der Sensor auf Höhe der Pflanzenspitzen positioniert werden, beziehungsweise zu Beginn des Versuchs auf die Höhe der Samen.

Im Laufe des Versuchs werden die Einstellungen regelmäßig überprüft und auf das Wachstum der Pflanzen angepasst. Die Lichtintensität muss bei fortgeschrittenem Wachstum der Pflanzen gegebenenfalls geändert werden.

In diesem Versuch werden zwei unterschiedliche Lichtprogramme eingestellt. Ersteres ist für die Keimungsphase der Samen und wird für 10 Tage laufen. Für den anschließenden Versuchszeitraum wird eine Lichteinstellung für die fortgeschrittenen Pflanzen gewählt. Beide Einstellungen unterscheiden sich in der Intensität und der Qualität.

Der Tag-/Nachtrhythmus wird simuliert mit 18 Stunden Tag- und sechs Stunden Nachtphase für beide Lichtprogramme. Auf das Einstellen von Dämmerungsphasen wird hierbei verzichtet. Die jeweiligen Werte für die Lichtintensität sind für den Zeitraum von 5 Uhr morgens bis 23 Uhr abends aktiv. Danach werden alle Werte für die Nachtphase von sechs Stunden auf Null gesetzt. Die gewählten Einstellungen sind den folgenden Abschnitten zu entnehmen.

### Keimungsphase

Für die Keimungsphase wird zunächst eine Intensität von  $200 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  gewählt. Bei einer Photoperiode von 18h ergibt sich eine Photonenmenge von ungefähr  $13 \text{ mol}/\text{m}^2/\text{d}$ :

$$200 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot \frac{60\text{s}}{1\text{min}} \cdot \frac{60\text{min}}{1\text{h}} \cdot \frac{1\text{mol}}{10^{-6}\mu\text{mol}} = 0,72 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad (6.1)$$

$$0,72 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \cdot 18 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 12,96 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \quad (6.2)$$

In der nachfolgenden Tabelle 6.1 sind die gewählten Lichteinstellungen für die Keimungsphase aufgelistet. Es sind die Werte für die Lichtintensität angegeben, wie sie in der Software verwendet werden. Außerdem sind die mit dem Quantensensor gemessenen Werte angegeben.

**Tab. 6.1.:** Das Lichtprogramm für die Keimungsphase. Angegeben sind die jeweiligen Werte, welche in der Software der LED-Lampe verwendet werden sowie die über der Matte gemessenen Lichtintensitäten.

Lampe	450 nm	660 nm	735 nm	5700 K	gemessene Intensität
1	550	550	1000	500	207
2	550	550	1000	500	201
3	600	600	1000	600	205
4	550	550	1000	500	204

### Wachstumsphase

In der Wachstumsphase wird die Lichtintensität erhöht. Außerdem wird die Lichtqualität, also die Zusammensetzung zwischen rotem und blauem Licht, verändert. Diese wirkt sich positiv auf den weiteren Wachstumsverlauf aus, da die Pflanzen durch einen höheren Blauanteil im Licht stabilere Blätter ausbilden. Aufgrund des Abstandes zwischen den Lampen und der Saatgut-Matte werden die Einstellungen der Lampe sehr hoch gewählt. Die getroffenen Einstellungen für die Lampe und die mit dem Quantensensor gemessenen Intensitäten sind der Tabelle 6.2 zu entnehmen. Durch diese Einstellungen wird eine ungefähre Intensität von  $225 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$  auf Höhe der Pflanzen erreicht. Die tägliche Photonenmenge summiert sich dadurch auf knapp  $15 \text{ mol}/\text{m}^2/\text{d}$  und liegt in einem empfohlenen Bereich, um verbrannte Blattspitzen zu vermeiden [13].

$$225 \frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot \frac{60\text{s}}{1\text{min}} \cdot \frac{60\text{min}}{1\text{h}} \cdot \frac{1\text{mol}}{10^{-6}\mu\text{mol}} = 0,81 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad (6.3)$$

$$0,81 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \cdot 18 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 14,58 \frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \quad (6.4)$$

**Tab. 6.2.:** Das Lichtprogramm für die Wachstumsphase. Wie in der Tabelle zu der Keimungsphase sind die Werte für die Softwareeinstellungen der Lampe und die über der Folie gemessenen Lichtintensitäten angegeben.

Lampe	450 nm	660 nm	735 nm	5700 K	gemessene Intensität
1	950	550	1000	550	229
2	1000	600	1000	600	224
3	1000	600	1000	650	221
4	1000	600	1000	600	225

### 6.4.3. Das Bewässerungsintervall

Die Pflanzen müssen zu jeder Zeit mit ausreichend Wasser versorgt werden, um ein erfolgreiches Wachstum zu ermöglichen. Um dies umzusetzen, muss zunächst die von Salat benötigte Menge an Wasser bestimmt werden. In der Tabelle 6.3 sind die zur Berechnung der mindestens erforderlichen Wassermenge verwendeten Daten für Salat aufgelistet. Diese Daten stammen aus Experimenten zum Pflanzenwachstum durchgeführt von R.M. Wheeler am Kennedy Space Center [13] und werden als Referenzwerte angenommen.

**Tab. 6.3.:** Auswahl gesammelter Daten aus Experimenten zum Pflanzenwachstum erweiterter Lebenserhaltungssysteme [13], welche für die Auslegung des Bewässerungsintervalls verwendet werden.

Merkmal	Wert
Wachstumsperiode $[d]$	28
Pflanzendichte $[1/m^2]$	20
Wasserverbrauch $[l/m^2/d]$	2,1

Anhand der Daten aus der Tabelle ist erkennbar, dass der gleiche Versuchszeitraum ausgewählt wurde und dadurch ein vergleichbarer Wasserverbrauch zu erwarten ist.

Der Wert des Wasserverbrauchs beschreibt die verwendete Wassermenge inklusive der gelösten Nährstoffe [13]. Da diese Größe von Interesse ist, wird die minimale Wassermenge mit Hilfe dieser Angabe bestimmt. Zunächst muss der Verbrauch an Nährlösung pro Tag für eine einzelne Pflanze  $V_P$  aus dem Wasserverbrauch  $V_{ges}$  und der Pflanzendichte  $P$  bestimmt werden.

$$\frac{V_{ges}}{P} = V_P \quad (6.5)$$

$$\frac{2,1 \frac{1}{m^2 \cdot d}}{20 \frac{1}{m^2}} = 0,105 \frac{1}{d}$$

Mit diesem täglichen Verbrauch pro Pflanze  $V_P$  kann für eine Saatgut-Matte und den gesamten Versuchsaufbau die minimale Wassermenge bestimmt werden, die von den Pflanzen benötigt wird. Pro Saatgut-Matte sind zwölf Pflanzen vorgesehen, insgesamt folglich 24. Für die Pflanzen einer Matte werden mindestens 1,261/d benötigt, für beide die doppelte Menge von 2,521/d.

$$V_{SM} = V_P \cdot 12 = 0,105 \frac{1}{d} \cdot 12 = 1,26 \frac{1}{d} \quad (6.6)$$

$$2 \cdot V_{SM} = 2,52 \frac{1}{d} \quad (6.7)$$

Mit der im Versuch verwendeten Pumpe können pro Stunde 1500 bis 3000 Liter gefördert werden und somit auf der kleinsten Einstellung 25l/min in beide Saatgut-Matten eingeleitet werden. Dadurch wird in einer Minute bereits das Fünffache der erforderlichen Wassermenge für die Pflanzen zur Verfügung gestellt.

Da die Pflanzen die Wassermenge nicht in der kleinen Zeitspanne von einer Minute aufnehmen können, muss dafür gesorgt werden, dass kontinuierlich über den Tag verteilt geringe Mengen Wasser in dem Kreislauf zirkulieren. Durch das Einstellen von Bewässerungsintervallen kann sichergestellt werden, dass die Pflanzen mitsamt den Steinwollhalterungen nicht austrocknen.

Zu beachten ist, dass innerhalb der Saatgut-Matte ein bestimmtes Volumen mit der Nährlösung ausgefüllt werden muss, um diese vollständig zu füllen. Nur bei einer vollständigen Füllung der Matte kann sichergestellt werden, dass die Pflanzenhalterungen mit der Nährlösung unterspült werden und somit die Wurzeln diese aufnehmen können.

Bevor der Versuch startet, werden einige Tests zur Überprüfung des Wasserkreislaufs durchgeführt, um die Verbindungsstellen auf ihre Dichtigkeit zu kontrollieren. Dabei wird die Zeit

gemessen, welche von der Nährlösung benötigt wird, um vom Zeitpunkt des Einschaltens der Pumpe bis zum Austreten am Rücklauf der Saatgut-Matte zu gelangen. Dieser Vorgang wird fünf Mal wiederholt, sodass ein Mittelwert gebildet werden kann. Dieser Mittelwert wird genutzt, um zu ermitteln, wie lange die Pumpe mindestens eingeschaltet sein muss. Diese gemittelte Zeit wird verdoppelt. Dadurch kann das vollständige Bewässern aller Pflanzen sicher gestellt werden, die Steinwollstücke können sich mit der Nährlösung vollsaugen und eine ausreichende Zirkulation im Wasserkreislauf kann erreicht werden, um stehende Flüssigkeit in der Matte zu vermeiden. Anhand dieser Voraussetzungen wird die Pumpe alle 60 Minuten für vier Minuten eingeschaltet. Dieses Bewässerungsintervall wird nach 10 Tagen des Versuchs gestartet. Davor befinden sich die Salatpflanzen in der Keimungsphase, sodass lediglich das Austrocknen der Steinwolle zu vermeiden ist. In anderen Experimenten zur Salatzucht wird in diesem Wachstumsstadium eine Bewässerung von jeweils 15 Minuten alle zwölf Stunden als ausreichend erachtet [23]. Für diesen Versuch soll die Bewässerung ebenfalls 15 Minuten erfolgen, jedoch alle vier Stunden. Mit dieser Verringerung des zeitlichen Abstandes zwischen den Bewässerungsphasen wird sichergestellt, dass die Samen dauerhaft feucht gehalten werden. Aufgrund der geringen Speicherkapazität der Steinwolle und einer höher zu erwartenden Transpiration durch die Wärme der LED-Lampen wird dies als nötig erachtet.

In der folgenden Tabelle 6.4 sind die gewählten Bewässerungsintervalle zusammengefasst aufgelistet. Zu sehen ist der für beide Intervalle ausgewählte Anwendungszeitraum und die dazugehörigen Bewässerungs- und Trockenzeiten.

**Tab. 6.4.:** Die gewählten Bewässerungsintervalle für den Versuch. Für beide Intervalle wurde der Zeitraum der Anwendung während des Versuchs und die Bewässerungs- und Trockenzeit festgelegt.

Intervall	Versuchszeitraum	Intervalldauer	Bewässerungszeit
Nr. 1	Tag 1-10	4 h	15 min
Nr. 2	Tag 11-28	1 h	4 min

#### 6.4.4. Die Laborumgebung

Innerhalb des Labors sind die Atmosphärenparameter für die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit für das Pflanzenwachstum von Bedeutung. Beide Werte werden während des Versuchszeitraums beobachtet und gegebenenfalls angepasst.

##### Temperatur

Die Umgebungstemperatur innerhalb des Labors beeinflusst das Wachstum der Pflanzen. Das Wachstum wird durch bestimmte Enzyme gesteuert, welche die chemischen Wachstumsprozesse innerhalb der Pflanze anstoßen. Die Enzyme arbeiten am Besten in einem schmalen Temperaturbereich, welcher sich je nach Pflanzenart unterscheidet. Wird dieser Bereich unter- oder überschritten, steht die Pflanze unter Stress. Dies kann im schlimmsten Fall zum Absterben der Pflanze führen. Um ein erfolgreiches und schnelles Wachstum zu ermöglichen, ist das Einstellen der optimalen Temperatur für die Pflanze erforderlich. [23]

Typische Werte zur Anzucht von Salat liegen zwischen 19 °C und 23 °C [23]. Im späteren MEPA-

System unterliegen die Pflanzen keiner Temperaturkontrolle mehr, weshalb die Umgebungstemperatur auf einen Standardwert von 20 °C festgelegt wird. Dieser Wert wird durch die im Labor installierte Klimaanlage gesteuert.

### **Luftfeuchtigkeit**

Die Luftfeuchtigkeit beeinflusst wie die Temperatur das Pflanzenwachstum. Durch eine zu hohe relative Luftfeuchtigkeit wird die Transpirationsrate vermindert. Die Transpiration ist wichtig für die Pflanze und ermöglicht einen erfolgreichen Transport der Nährstoffe von der Wurzel bis in die Blätter sowie eine Kühlung der Blattoberflächen. Zu hohe Luftfeuchtigkeiten fördern zudem die Ausbreitung von Schimmel und Krankheiten. Für eine erfolgreiche Anzucht von Salat wird eine Luftfeuchtigkeit von mindestens 50% bis maximal 70% angegeben. [23]

Im Versuch wird eine relative Luftfeuchtigkeit von 50% angestrebt.

#### **6.4.5. Einsetzen der Samen**

Die Pflanzen werden, anders als in verschiedenen hydroponischen Versuchen zu Salat, nicht in einem separierten Anzuchtbereich herangezogen. Dies ergibt sich aus der Anforderung an die Saatgut-Matte, bereits alle nötigen Elemente, außer die Nährstofflösung zur Kultivierung der jeweiligen Pflanze, zu enthalten. Dazu gehören auch die Samen der Pflanzen, welche bereits in der Matte positioniert sein sollen.

Aus diesem Grund sollen die Samen in diesem Versuch bereits vor der Keimung in der Steinwolle positioniert werden. Es werden jeweils zwei bis drei Samen in den Steinwollhalterungen mit einer Pinzette positioniert. Da nicht immer alle Samen zu keimen beginnen, werden anfänglich mehrere in einer Halterung eingebracht. Das Loch innerhalb dieser Halterungen ist, im Vergleich zu den Samen, sehr groß, weshalb zusätzliches Material aus Steinwolle hinzugefügt wird. Dadurch kann verhindert werden, dass die Samen durch die Bewässerung weggespült werden.

Für den Fall, dass die Samen in einzelnen Steinwollstücken nicht zu keimen beginnen, werden in separierten Schalen weitere Samen in Steinwolle herangezogen. Diese werden zwischen beiden Anzuchtkanälen der Saatgut-Matte positioniert, um die gleichen Temperatur- und Lichtverhältnisse zu gewährleisten. Für den Fall, dass die Pflanze nach einer erfolgreichen Keimung nicht überlebt, können die Ersatzpflanzen an deren Stelle positioniert werden, damit weiterhin eine Beurteilung der Saatgut-Matte, beispielsweise in dem Wurzelwachstum, stattfinden kann.

#### **6.4.6. Anpassungen am Aufbau**

Während der Versuchsdurchführung können unvorhergesehene Ereignisse auftreten, welche Veränderungen am Aufbau erfordern. Diese sollen keinen Einfluss auf die gewählten Versuchsparameter nehmen, sondern dazu dienen, diese bestmöglich aufrecht zu erhalten. In diesem Abschnitt werden alle durchgeführten Veränderungen kurz beschrieben.

### Dichtungsringe für die Pflanzeninterfaces

Bei den Tests zur Dichtigkeit des Wasserkreislaufs vor dem Versuchsbeginn wurden mehrere Wasseraustritte an den Pflanzeninterfaces festgestellt. Diese werden durch die Druckqualität der Pflanzenhalterungen verursacht, da sich die beiden Teile der Halterung bei der Fertigung verzogen haben. Aufgrund des Verzugs sind beide Einzelteile nicht über den ganzen Gewindegang miteinander zu verschrauben.

Um die entstandene Lücke im Wasserkreislauf zu beheben, werden Dichtungsringe in den Halterungen eingebracht. Dazu werden die Dichtungsringe mit einem fettenden Stoff umhüllt, welcher die abdichtende Wirkung zusätzlich unterstützt.

### Abkleben der Sichtfelder

Nach drei Tagen sind undichte Stellen an den Sichtfenstern aufgetreten, durch welche sich die Nährlösung auf der Oberfläche der Folie verteilt hat. Dadurch wird unerwünschtes Algenwachstum gefördert. Die Sichtfenster werden deshalb mit Hilfe von Aluminium-Klebeband vollständig abgeklebt und versiegelt, wie in Abbildung 6.14 zu sehen. Insgesamt werden dadurch drei von fünf Fenstern unbrauchbar.

Es entsteht kein Nachteil für den Versuch, da die Sichtfenster lediglich als zusätzliche Beobachtungsoption in die Folie eingearbeitet sind.



**Abb. 6.14.:** Das abgedichtete Sichtfenster - Auf der Folie mit Aluminium-Klebeband versiegeltes Sichtfenster, um Wasseraustritte zu vermeiden.

## 7. Beobachtungen und Auswertung des Versuchs

Um die Funktionsweise der Saatgut-Matte beurteilen zu können, müssen die Beobachtungen zu den Salatpflanzen während des Versuchs mit den zu erwartenden Wachstumsergebnissen abgeglichen werden. Dafür wird im folgenden Abschnitt 7.1 zunächst das Wachstum von Salatpflanzen in hydroponischen Anlagen beschrieben. Nach einer anschließenden Beschreibung des Pflanzenwachstums im Labor (Abschnitt 7.2) können diese beiden Ergebnisse miteinander verglichen werden.

Die Saatgut-Matte ist ein neuartiges System und wird anhand der Beobachtungen im Labor analysiert. Dazu wird das Materialverhalten, auftretende Undichtigkeiten und das Zusammenspiel von Pflanze und Saatgut-Matte bewertet. Der Versuchszeitraum ist für 28 Tage geplant. Eine genauere Betrachtung der Pflanzen und der Saatgut-Matte erfolgt an Tag 30 nach dem Versuchsbeginn. Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann abschließend das Leistungspotential der Matte mit der gewählten Bewässerungsmethode für das MEPA-System beurteilt werden. Ein Ausblick auf die anschließend möglichen Entwicklungen der Saatgut-Matte wird in Abschnitt 7.4 gegeben.

### 7.1. Erwartungen

Das Ziel des Versuchs ist die Erprobung der Saatgut-Matte mit der NFT als hydroponische Bewässerungsmethode für das MEPA-System. Dazu werden einige Erwartungen formuliert, welche mit den Ergebnissen abgeglichen werden können. Die Erwartungen ergeben sich aus den Anforderungen der Saatgut-Matte, welche in Abschnitt 4.1.1 und 4.1.2 aufgestellt sind. Die folgende Auflistung beinhaltet die Punkte, auf welche die Saatgut-Matte und die Pflanzen überprüft werden sollen:

- Gleichmäßiges Wachstum der Pflanzen unabhängig von der Position auf der SCM
- Gesundes Wachstum ohne trockene / welke Stellen und ohne Schimmel
- Gleichmäßige Nährlösungsverteilung in beiden Matten
- Ausreichend Halt ausgehend vom Pflanzeninterface für die Pflanze
- Genügend Platz für das Wurzelwachstum innerhalb der Kanäle
- Dauerhafte Abdichtung der SCM ohne Flüssigkeitsaustritt
- Geringer Materialverschleiß der Folie in dem Testzeitraum



Um Erwartungen an das Pflanzenwachstum von Salat stellen zu können, muss bekannt sein, wie der gewöhnliche Wachstumsverlauf einer Salatpflanze aussieht. Der typische Wachstumsverlauf einer Salatpflanze zeigt einen über die Zeit exponentiellen Anstieg von Biomasse [14], welcher in diesem Versuchsablauf ebenfalls zu erwarten ist.

Anhand des Pflanzenwachstums auf der Matte kann beurteilt werden, wie gut die Verteilung der Nährlösung innerhalb der Kanäle und in beiden Saatgut-Matten erfolgte.

## 7.2. Beobachtungen

Während der Versuchskampagne sind alle Beobachtungen und Labortätigkeiten im Zusammenhang mit dem Versuch dokumentiert worden. In diesem Abschnitt werden die Beobachtungen an Pflanzen und Saatgut-Matte beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf dem Wachstum der Pflanzen und dem Verhalten der Saatgut-Matte.

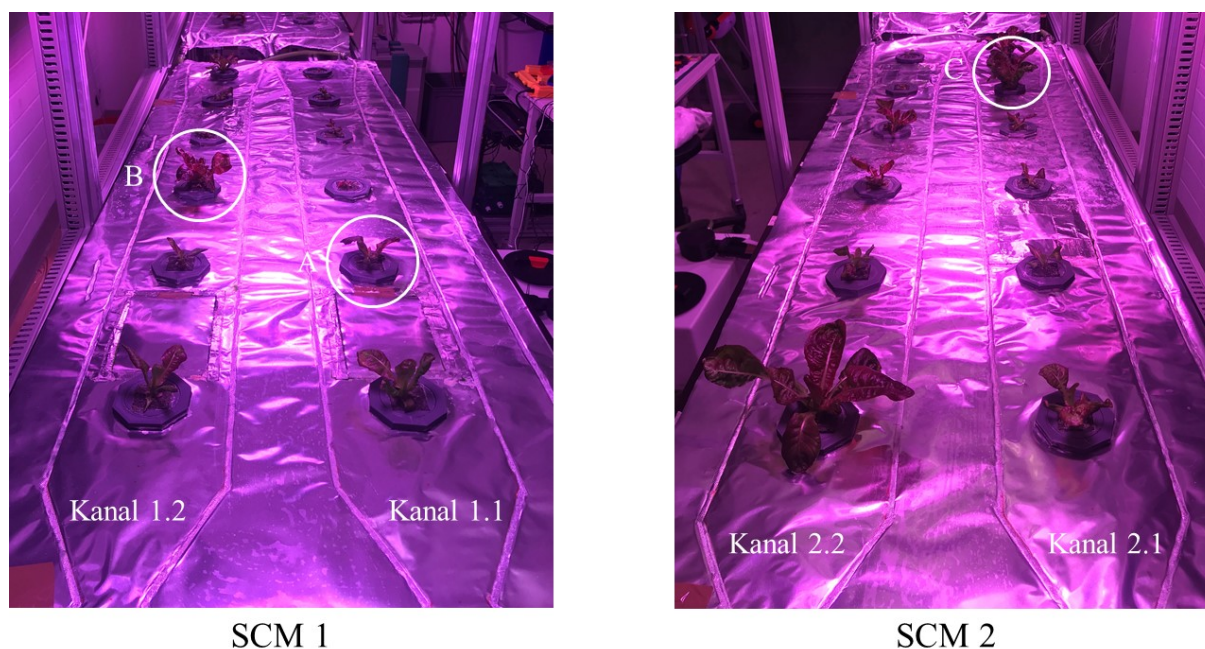
Geplant ist ein Zeitraum für den Versuch von vier Wochen, entsprechend 28 Tagen. Aufgrund der Zugangsmöglichkeiten in das Labor wird die Dauer auf 30 Tage verlängert. Im weiteren Verlauf werden die zeitlichen Abschnitte mit dem jeweiligen Versuchstag bezeichnet. An Tag 1 sind die Samen in die Matte eingesetzt worden, die Aufnahmen und genaueren Betrachtungen der Pflanzen sind an Tag 30 erfolgt.

### 7.2.1. Pflanzen- und Wurzelwachstum

Am ersten Versuchstag sind die Samen der Salatpflanzen in die Steinwolle des Pflanzeninterface eingebracht worden und nach zwei Tagen sind die ersten aufgekeimt. Die restlichen Samen folgen in der darauffolgenden Woche, bis nach sieben Tagen in jeder Pflanzenhalterung eine gekeimte Pflanze zu sehen ist. Durch diesen zeitlichen Versatz von einer Woche sind bereits zu Beginn des Versuchszeitraums Differenzen in der Entwicklung der Pflanzen zu sehen. Nach dieser ersten Woche weisen mehr als die Hälfte der Pflanzen mindestens ein Blatt auf, bei drei Pflanzen ist bereits das dritte Blatt zu sehen. Bei ebenfalls drei Pflanzen zeichnet sich wenig bis kein Wachstum ab, weshalb diese mit den zu Beginn bereitgestellten Ersatzpflanzen ausgewechselt werden. Eine Größe von etwa einem Zentimeter ist nach vierzehn Tagen erreicht und die Blätter färben sich der Sorte entsprechend rötlich. Nach drei Wochen hat das Wachstum stark zugenommen. Nach den angesetzten vier Wochen kann an Tag 30 eine durchschnittliche Größe von 6 cm bis 10 cm gemessen werden. Aufgrund des ungleichmäßigen Wachstums weisen die größten Pflanzen einen Durchmesser von 15 cm bis 20 cm auf.

Um beide Saatgut-Matten miteinander vergleichen zu können, sind diese an Versuchstag 30 in der Abbildung 7.1. Der Blick auf die beiden Matten geht von der Wasserblase in Richtung der Anzuchtkanäle, welche entsprechend ihrer Position bezeichnet werden. Um die Pflanzen ebenfalls bezeichnen zu können, werden diese mit der Nummer des Kanals und einer zusätzlichen Nummer, welche sich von der Lage der Pflanzenhalterung ableitet, benannt. So werden die Nummern 1 bis 6 vom Kanaleingang beginnend vergeben.





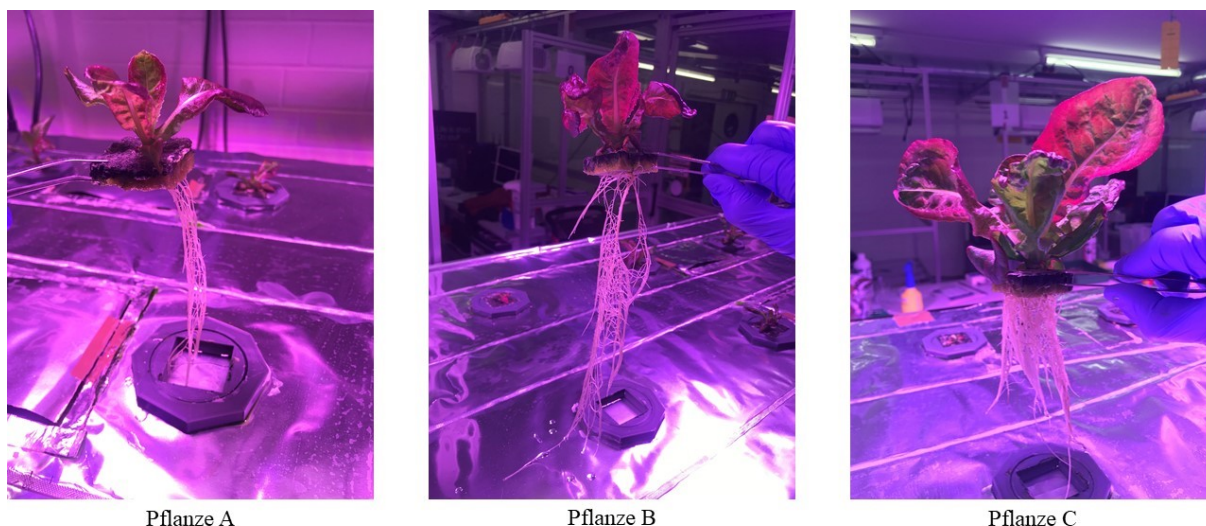
**Abb. 7.1.:** Beide Saatgut-Matten an Tag 30 des Versuchs. Die Saatgut-Matte 1 weist im Vergleich kleinere Pflanzen als die Saatgut-Matte 2 auf. Die Pflanzen, welche mit den Buchstaben A, B und C gekennzeichnet sind, gehören zu verschiedenen Wachstumsphasen. Auf diese drei Pflanzen wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

Anhand der Pflanzengröße und -entwicklung können die Salatpflanzen in die drei Wachstumsstadien klein (1), mittel (2) und groß (3) sowie kein Wachstum (0) kategorisiert werden. Die Zuteilung des Wachstumsstadiums zu jeder Pflanze ist Tabelle 7.1 zu entnehmen. Es können jeweils vier Pflanzen den Kategorien (0) und (3) zugeteilt werden. Sechs Pflanzen werden dem Stadium 1 und zehn Pflanzen dem Stadium 2 zugeordnet.

**Tab. 7.1.:** Die Einteilung der Pflanzen in Wachstumsstadien. Die Pflanzen werden anhand ihrer Position beginnend am Kanaleinlass mit den Nummern 1 bis 6 bezeichnet. Jeder Pflanze kann ein Entwicklungsstadium zugeteilt werden: kein Wachstum (0), klein (1), mittel (2) und groß (3).

Pflanze	Kanal 1.1	Kanal 1.2	Kanal 2.1	Kanal 2.2
1	2	2	2	3
2	2	1	2	2
3	0	3	1	2
4	1	1	1	2
5	1	2	3	0
6	0	2	3	0

Die in Abbildung 7.1 mit A, B, und C gekennzeichneten Pflanzen werden aus ihren Halterungen herausgenommen, um die Wurzeln sehen zu können. Diese drei Pflanzen wurden ausgewählt, weil sie sich in ihrem Wachstum unterscheiden und den verschiedenen Entwicklungsstadien klein, mittel und groß zuzuordnen sind. Zudem befinden sich diese in verschiedenen Kanälen. In Abbildung 7.2 sind die drei Pflanzen mit den Wurzeln und ohne die Halterung zu sehen. In Tabelle 7.2 sind die dazugehörigen Werte zu der Größe der Pflanze und der Länge der Wurzeln abzulesen.



**Abb. 7.2.:** Darstellung der Wurzeln von drei verschiedenen Pflanzen mit den Bezeichnungen A,B und C, wobei die Größe der Pflanzen von A bis C zunimmt. Bei den Exemplaren A und B ist eine eher lange und schmale Wurzelverbreiterung zu sehen, wohingegen die Wurzeln der Pflanze C kompakt und kurz gewachsen sind.

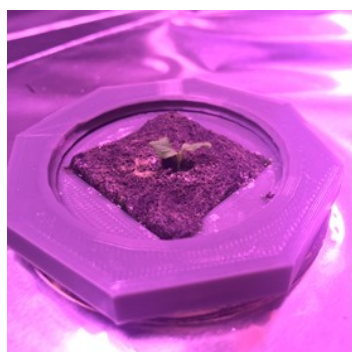
Die Größe der Pflanzen nimmt von A bis C zu. Zu erkennen ist, dass das Wachstum der Wurzeln nicht mit der Größe der Pflanzen übereinstimmt. Die Wurzeln von B und C sind mit 24 cm und 27 cm ähnlich lang. Der Abstand zwischen zwei Pflanzen in einem Kanal beträgt 25 cm, die Wurzeln dieser Pflanzen reichen somit bis zu den nachfolgenden Pflanzen. Pflanze C weist ein sehr kompaktes Wurzelwachstum auf mit einer maximalen Länge von 14 cm. Keine der drei Wurzeln zeigt Änderungen im Wachstum zwischen dem Bereich unterhalb und neben des PIs. Die Farbe der Wurzeln sind in einem einheitlich hellen Ton und keine weisen Anzeichen von Krankheiten auf.

**Tab. 7.2.:** Gemessene Daten zu dem Pflanzen- und Wurzelwachstum der Pflanzen A, B und C. Die Werte für die Größe der Pflanzen und die maximale Länge des Wurzelwerks sind aufgelistet. Die Höhe der Pflanze wird ab der Steinwolloberfläche gemessen, die Länge der Wurzeln beginnend von der Unterseite.

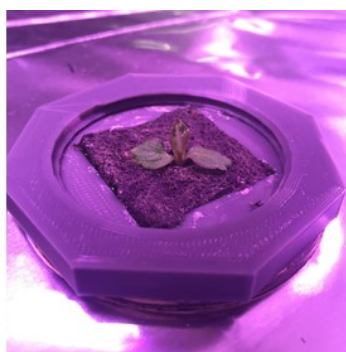
Pflanze	Höhe [cm]	Wurzellänge [cm]
A	4-5	24
B	6-7	27
C	10 -11	14

Zusätzlich zu der gemeinschaftlichen Betrachtung des Pflanzenwachstums auf beiden Saatgut-Matten wird das Wachstum einer einzelnen Pflanze über den Versuchsablauf beobachtet und dokumentiert. Abbildung 7.3 zeigt den Wachstumsverlauf einer Salatpflanze auf der Saatgut-Matte über den Versuchszeitsraum hinweg. Diese befindet sich in Kanal 2.1 an der Position 6. Dabei zeigen die ersten drei Bilder jeweils die gleiche Sicht auf die Pflanze. Ab dem vierten Bild wurde die Perspektive der Aufnahme an das Wachstum angepasst.

In den ersten zwei Wochen bis zum Tag 15 erreichen die Blätter eine maximale Länge von 3 cm. Nach weiteren zwei Wochen ist die Pflanze auf eine Größe von 25 cm im Durchmesser angewachsen. Dieses Exemplar ist eine der schneller wachsenden Pflanzen und gehört am Ende der Versuchs zu den größten Pflanzen. Anhand dieses Wachstumsverlaufs lässt sich das exponentielle Wachstum von Salat erkennen.



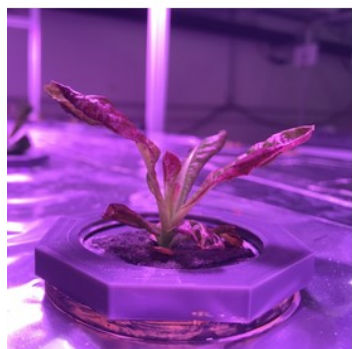
Tag 3



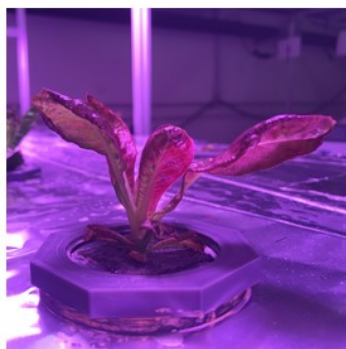
Tag 8



Tag 15



Tag 22



Tag 25



Tag 30

**Abb. 7.3.:** Der Wachstumsverlauf einer Pflanze im Labor. Alle Bilder zeigen die gleiche Pflanze in verschiedenen Stadien ihres Wachstums. Die Perspektive für die oberen und unteren Bilder ist jeweils dieselbe. Das exponentielle Wachstum der Salatpflanze wird ersichtlich.



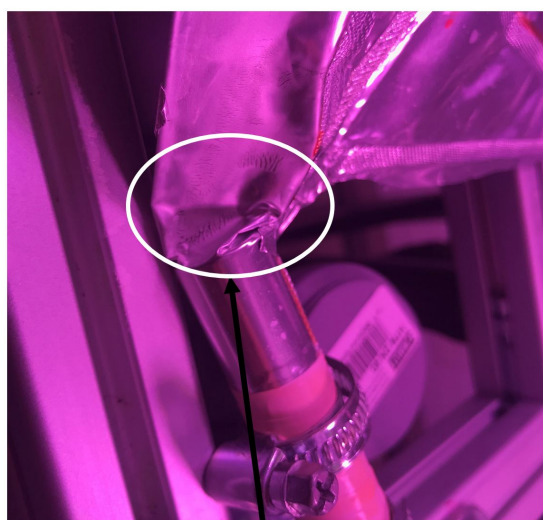
### 7.2.2. Betrachtung des Folienschlauchs

Neben dem Wachstum der Pflanzen dient die Betrachtung des Folienschlauchs zur Beurteilung der Saatgut-Matte. Hier wird besonders auf die Verarbeitung der Matte und das Materialverhalten geachtet.

Während des Versuchs sind im Bereich des Sichtfensters Undichtigkeiten aufgetreten, wie in Abschnitt 6.4.6 beschrieben. Dadurch konnte Flüssigkeit auf der Oberseite der Matte austreten. Durch das Verdunsten des Wassers aus der ausgetretenen Nährlösung sind Ablagerungen auf der Oberseite der Folie entstanden und es konnten sich Salzkristalle bilden. Um Beschädigungen des Materials durch die Ablagerungen zu vermeiden, werden diese regelmäßig entfernt, da die Sichtfenster nur für den Einsatz in diesem Prototypen vorgesehen sind.

Durch die Bewässerungsintervalle haben die Bereiche der Folie, in denen die Flüssigkeit transportiert wird, regelmäßig Bewegung erfahren. An einigen dieser Bereiche konnten Veränderungen des Materials beobachtet werden. Wie in der Abbildung 7.4 zu sehen, haben sich in der Folie nebeneinander angeordnete dunkle Striche gebildet. Es könnte sich bei den Strichen um eine Materialermüdung handeln. Da an diesen keine Flüssigkeit austritt, können Löcher in dem Material ausgeschlossen werden. In der Abbildung 7.4 ist ebenfalls eine Materialveränderung zu erkennen. An dieser Stelle ist die Flüssigkeit durch die Folie sichtbar, es hat sich folglich ein Teil der Aluminiumbeschichtung abgelöst. Eine der Kunststoffschichten ist weiterhin intakt, wodurch keine Undichtigkeit auftritt.

Beide Veränderungen des Folienmaterials sind in der SCM 1 aufgetreten, in der SCM 2 konnten keine Auffälligkeiten gefunden werden.



Materialveränderung im  
Bereich des Zulaufs



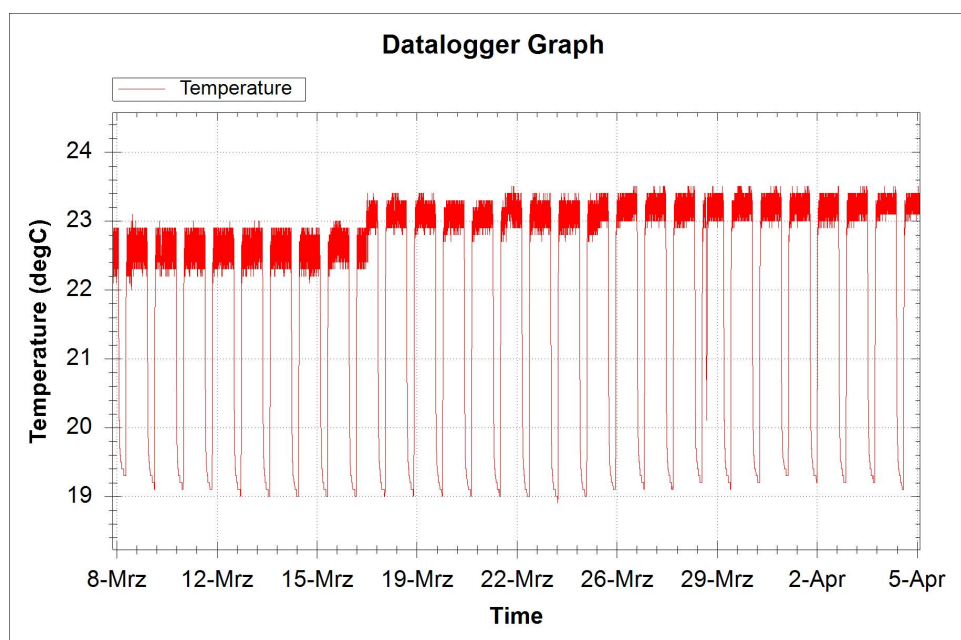
Ablösung der  
Aluminiumschicht

**Abb. 7.4.:** In der Matte aufgetretene Materialveränderungen. Auf der linken Seite sind die nebeneinander angeordneten Streifen direkt am Kanaleingang des Zulaufs zu erkennen. Die rechte Seite zeigt eine Ablösung der Aluminiumschicht in dem Folienmaterial kurz vor dem Rücklauf des Folienschlauchs.

### 7.2.3. Die aufgenommenen Laborwerte

Im Labor wurden während des Versuchszeitraums die Werte für die Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie die Messwerte für den EC- und pH-Wert in regelmäßigen Abständen gemessen und dokumentiert. Diese manuell aufgezeichneten Daten und die daraus erstellten Diagramme zu Luftfeuchtigkeit und Temperatur sind in Anhang B zu finden. Zusätzlich wurde mit Hilfe der beiden verwendeten Datenlogger die vorherrschende Temperatur über den gesamten Versuchszeitraum aufgezeichnet. Diese Datenlogger haben über die 30 Tage in Abständen von fünf Minuten die Temperatur gemessen und abgespeichert, sodass der Temperaturverlauf während der Tag- und Nachtphase aufgezeichnet wurde.

In Abbildung 7.5 ist das Diagramm des Datenloggers zu sehen, welcher neben der SCM 1 positioniert wurde, die Aufzeichnung des zweiten Datenloggers ist nach 20 Tagen aufgrund einer nicht ausreichenden Stromversorgung abgebrochen. Das Diagramm des zweiten Datenloggers befindet sich in Anhang B in Abbildung B.4.



**Abb. 7.5.:** Diagramm aus den Werten des Datenloggers von SCM 1. Zu sehen ist der Tag- und Nachtwechsel mit Werten zwischen 19 °C und 23 °C. Nach zehn Tagen ist ein Sprung in der Tagestemperatur zu sehen - an diesem Tag wurde die Belichtungsintensität geändert.

In dem Diagramm des ersten Datenloggers ist der Wechsel zwischen den Tages- und Nachttemperaturen zu sehen. Tagsüber liegt die Temperatur in den ersten zehn Tagen zwischen 22 °C und 23 °C, danach steigt die Tagestemperatur ungefähr um ein halbes Grad. Die Nachttemperatur befindet sich durchgehend bei einem Minimum von 19 °C.

Die manuell aufgezeichneten Werte für die Luftfeuchtigkeit befinden sich dauerhaft in einem Bereich zwischen 40% bis 50%. In dem Diagramm in Abbildung B.2 in Anhang B ist eine Trendlinie eingezeichnet, anhand welcher sich der leichte Anstieg in der Luftfeuchtigkeit erkennen lässt.

Die gemessenen Werte für den pH- und EC-Wert sind während des gesamten Zeitraums an die vorgegebenen Werte angepasst worden. Die dokumentierten Daten (siehe Anhang B, Abbildung

B.1) zu beiden Messwerten befinden sich dadurch dauerhaft in diesen Bereichen. Der minimale pH-Wert lag bei 5,6 und der maximale bei 6,0. Die Lösung wurde fünfmal in ihrem Säuregehalt korrigiert. Der EC-Wert lag in der ersten Woche dauerhaft bei 1,4, anschließend konnte ein Wert von 1,5 gemessen werden. Im Versuchszeitraum wurden der Lösung keine Nährstoffe zugeführt.

### 7.3. Auswertung der Saatgut-Matte

Die beschriebenen Beobachtungen aus Abschnitt 7.2 dienen als Grundlage für die Bewertung des Versuchs. Das Ziel ist die Beurteilung der Saatgut-Matte in ihrer Funktion, das Pflanzenwachstum erfolgreich zu ermöglichen. In den vier Wochen ist es gelungen, auf den Saatgut-Matten insgesamt 21 von 24 Pflanzen heranzuziehen. Dabei sind die Pflanzen in dem System gekeimt und haben zum Zeitpunkt des Versuchsendes unterschiedlich fortgeschrittene Wachstumsstadien erreicht. In Hinsicht auf die gestellten Anforderungen an das System werden die Beobachtungen im Folgenden gedeutet und beurteilt.

#### 7.3.1. Verteilung der Nährlösung

Die Nährstoffverteilung soll in beiden Matten gleichmäßig sein, was anhand vergleichbarer Entwicklungsstadien des Salats erkennbar ist. Ob die Nährlösung innerhalb einer Matte und innerhalb eines Anzuchtkanals gleichmäßig ist, lässt sich ebenfalls anhand des Entwicklungsstadiums und der dazugehörigen Pflanzengröße beurteilen. Bei einer ausgewogenen Verteilung der Nährlösung in allen Anzuchtkanälen der Matte sind gleiche Pflanzengrößen zu erwarten. Werden die vier Nährlösungskanäle miteinander verglichen, ist erkennbar, dass die Pflanzen in Kanal 1.1 ein geringeres Wachstum aufweisen als in den übrigen Kanälen. In Kanal 2.1 sind die Pflanzen mit dem größten Wachstum zu sehen. Werden die Saatgut-Matten miteinander verglichen, ist zu sehen, dass die Pflanzen auf der SCM 2 ein höheres durchschnittliches Wachstumsstadium erreicht haben. Die Nährlösung hat sich folglich in beiden Saatgut-Matten nicht in gleicher Weise verteilt. Die Wachstumsunterschiede können jedoch nicht mit einer Nährstoff-Unterversorgung der Pflanzen erklärt werden. Eine zu geringe Nährstoffkonzentration lässt sich durch eine proportionale Abnahme der Pflanzengröße entlang eines Anzuchtkanals deuten. Die Pflanzen am Anfang des Kanals nehmen die benötigten Nährstoffe auf, bis einzelne Elemente im weiteren Verlauf dieses Kanals nicht mehr zur Verfügung stehen und die Pflanzen in diesem Bereich unterversorgt sind. Ein solches Wachstumsschema ist nicht zu erkennen, die unterschiedlichen Stadien der Salatpflanzen sind entlang der Kanäle unterschiedlich.

Während der Bewässerungsintervalle sind geringe Unterschiede in der Ausbreitung der Nährlösung innerhalb der beiden Matten beobachtet worden. So ist in der ersten Saatgut-Matte die Nährlösung schneller durchgeflossen als in der zweiten. Die Strömungsgeschwindigkeit ist folglich in der ersten Matte höher. Dies könnte der Grund für die Wachstumsunterschiede sein, da durch eine zu schnelle Strömungsgeschwindigkeit die Wasser- und Nährstoffaufnahme vermindert wird. Diese Vermutung kann innerhalb dieser Arbeit nicht überprüft werden und bedarf weiterer Tests.

Trotz der Unterschiede in den Wachstumsstadien konnten in diesem Versuch alle Pflanzen in

dem Versuch mit Wasser- und Nährstoffen versorgt werden, sodass diese Kanalanordnung als Grundlage für weitere Entwicklungen dienen kann.

### **7.3.2. Gesundheit und Qualität der Pflanzen**

Um eine möglichst hohe Lebensmittelqualität zu erzeugen, muss das Wachstum von Algen und anderen Mikroorganismen so gering wie möglich gehalten werden. Dadurch sinkt die Gefahr von Krankheiten und Schimmel. Besonders an Stellen, an welchen sich mit Nährstoffen angereicherte Flüssigkeit sammelt, ist die Gefahr von unerwünscht hohem Algenwachstum und von Schimmelbildung gegeben. Hier kann sich der Nährstofffilm durch die künstliche und intensive Beleuchtung schneller erwärmen und bildet somit einen idealen Nährboden. Im Versuch ist Algenwachstum an den nicht mit Wachs beschichteten Seiten der Steinwollstücke und den undichten Rändern der Sichtfenster zu sehen (siehe Abbildung B.5 in Anhang B). Diese geringe Bildung von Algen ist jedoch tolerierbar und hat keine direkten negativen Auswirkungen auf die Pflanzen. Durch das Sichtfenster in das Innere der Kanäle ist erkennbar, dass die Algen sich nicht in diesen ausgebreitet haben. Schimmel ist lediglich auf der Oberfläche der Steinwolle von den drei abgestorbenen Pflanzen zu erkennen, wie in Abbildung B.6 in Anhang B dargestellt. Eine übermäßige Ausbreitung von Algen und Schimmel konnte bis zum Versuchsende erfolgreich verhindert werden.

Der Zustand und die Farbe der Blätter sind Indikatoren für die Qualität, so dürfen diese keine verbrannten Blattspitzen und anderweitig trockene Stellen zeigen. In diesem Versuch sind bei den Pflanzen keine Veränderungen an den Blättern erkennbar. Es ist folglich keine zu starke Lichtintensität gewählt worden, wodurch die Blätterspitzen vertrocknet wären. Die Blätter des Salats zeigen alle eine starke Rotfärbung. Dies ist durch die Auswahl der Salatsorte „Amerikanisch Brauner“ zu erklären und wird durch pflanzenspezifische Farbstoffe verursacht. Die Stärke der Farbe wird durch die eingestellte Lichtintensität verursacht, sodass dieser Punkt bei der Bewertung der Saatgut-Matte nicht weiter beachtet wird.

Als ein weiterer Punkt in der Beurteilung der Pflanzengesundheit wird das Wurzelwachstum betrachtet. Wie in Abschnitt 7.2.1 beschrieben, sind die Wurzeln alle in einem guten Zustand und zeigen keine Anzeichen von Krankheiten.

Mit biologischen Analysen kann eine genauere Beurteilung der Pflanzen erfolgen, diese sind in der Bewertung der Saatgut-Matte allerdings nicht nötig. Insgesamt kann die Qualität der Pflanze anhand der betrachteten Merkmale als gut bezeichnet werden.

### **7.3.3. Der Folienschlauch und das Pflanzeninterface**

Das System Saatgut-Matte muss mit all seinen Komponenten den Wasserkreislauf abdichten und schließen. Das Folienmaterial kann anhand von Abnutzungserscheinungen und anderen auftretenden Alterungserscheinungen beurteilt werden. Über den gesamten Versuchszeitraum hinweg sind keine Löcher in dem Folienmaterial aufgetreten.

Es konnten jedoch Veränderungen an vereinzelten Stellen im Folienmaterial beobachtet werden. Diese Veränderungen sind in Bereichen aufgetreten, welche regelmäßig durch die Bewässerungsintervalle bewegt werden. Da die Veränderungen jedoch nur an einer der beiden Matten im Bereich des Zu- und Rücklaufs vorzufinden sind, kann auf kein generelles Materialversagen ge-

geschlossen werden. Die Streifen im Bereich des Zulaufs lassen auf eine übermäßige Dehnung des Materials schließen. Am Rücklauf ist eine Ablösung der Aluminiumschicht zu beobachten, hier ist zu klären, ob diese aufgrund des Kontakts mit der leicht sauren Nährlösung erfolgt ist. Insgesamt zeigt das Material sowohl an den Schweißstellen als auch überall sonst keine weiteren Auffälligkeiten. Es hat sich über den Testzeitraum als sehr haltbar und robust gezeigt und somit als geeignet erwiesen. Um abschließend als geeignet für das MEPA-System befunden zu werden sind allerdings weitere Tests nötig, um die Haltbarkeit des Materials zu überprüfen.

Anhand des Pflanzenwachstums kann das Pflanzeninterface und dessen Anordnung in den Kanälen beurteilt werden. Das Wachstum der Salatpflanzen in die Höhe und die Breite wird durch ausreichenden Platz in keiner Richtung beeinträchtigt. Außerdem ist kein Abknicken von einzelnen Blättern oder anderen Pflanzenbestandteilen zu sehen. Dies deutet auf einen guten Halt durch das Interface hin. Nach dem Ende des Versuchs werden einzelne ausgewählte Pflanzen aus ihren Positionen genommen, um die Wurzeln dieser zu begutachten. Der Bereich unter der Pflanzenhalterung ist von besonderem Interesse, da die Halterung ein Hindernis für die Wurzeln zwischen der Steinwolle und dem übrigen Anzuchtkanal darstellt. Lediglich in den Bewässerungsphasen wird die Halterung durch den Flüssigkeitsstrom angehoben. Die Wurzeln zeigen keine Auffälligkeiten in diesem Bereich, sodass geschlussfolgert werden kann, dass das Pflanzeninterface keine Beeinträchtigungen im Wurzelwachstum verursacht. Das Pflanzeninterface kann insgesamt als positiv beurteilt werden, da es der Pflanze ausreichend Halt gibt und den Zugang zu der Nährlösung ermöglicht. Außerdem wurde kein Austreten von Flüssigkeit zwischen dem Interface und der Folie beobachtet, sodass die benötigte abdichtende Wirkung erfüllt wird.

Durch die Betrachtung der Ausprägung und Länge der einzelnen Wurzelstränge kann eingeschätzt werden, ob ausreichend Platz in dem Anzuchtkanal zu Verfügung steht. Die Ausbreitung der Wurzeln verläuft hauptsächlich in Strömungsrichtung, sodass an beiden Seiten keine Einschränkungen vorliegen und die Breite von 150 mm ausreichend ist. Einige Wurzelstränge haben in ihrer Länge bereits das nächste Pflanzeninterface erreicht, ohne das erntefähige Stadium erreicht zu haben. Bei einem weiter anzunehmenden Wachstum der Wurzeln, ist eine Beeinträchtigung der nachfolgenden Pflanze in der Nährstoffversorgung zu bedenken. Eine Vergrößerung des Abstandes innerhalb des Kanals sollte folglich in Betracht gezogen werden.

## 7.4. Diskussion und Ausblick

Das Ziel des Versuchs war die Erprobung der ausgelegten Saatgut-Matte. Diese soll auf Basis der Nährstoff-Film-Technik eine Anzucht von Pflanzen, in diesem Fall Salat, für das MEPA-System ermöglichen.

Die im Versuch verwendeten Saatgut-Matten stellen die ersten beiden Prototypen dieses neuartigen Systems dar. Während des Versuchs konnte innerhalb des Zeitraums von 30 Tagen erfolgreich Salat herangezogen werden. Obwohl einige Differenzen in den Wachstumsstadien zu erkennen sind, sind die Pflanzen in einem gesunden Zustand und in der Entwicklung zu einem erntefähigen Stadium. Die Laborergebnisse lassen darauf schließen, dass eine für die Pflanzen geeignete Umgebung geschaffen wurde. Durch die überall erfolgte Verteilung der Nährlösung im Versuch kann die theoretisch erstellte Kanalanordnung als geeignet beurteilt werden. Die gewählte hy-

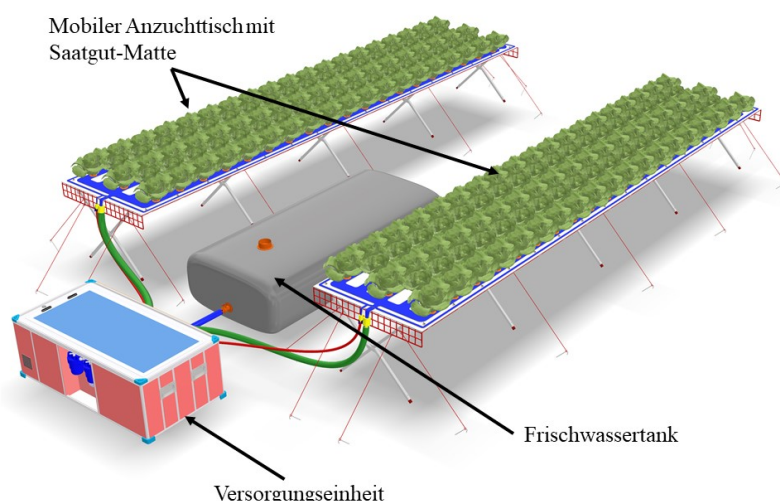


droponische Bewässerungsmethode der NFT eignet sich in dieser Form für die Saatgut-Matte folglich sehr gut. Das Folienmaterial zeigt über den gesamten Versuchszeitraum hinweg geringe Veränderungen, welche jedoch nicht zu einem Austreten von Flüssigkeit führten und somit die Funktion des Folienschlauchs nicht beeinflussen.

Aufgrund der limitierten Fläche, für welche die beiden Saatgut-Matten für das Labor angefertigt wurden, konnten einige Aspekte nicht ausreichend untersucht werden. So konnten nur zwei nebeneinander liegende Anzuchtkanäle erprobt werden, anstatt der vorgesehenen fünf. Zudem sind die Anzuchtkanäle um zwei Drittel kürzer als die theoretische Auslegung vorsieht. Auch die vorgesehene Naht in der Wasserblase wurde lediglich in den Vorversuchen getestet. Die Saatgut-Matte wurde in einer kontrollierten Laborumgebung verwendet und nicht entsprechend der vorgesehenen Verwendung im Freien, weshalb Wetter- und Umwelteinflüsse nicht mit in die Beurteilung des Pflanzen- und Materialverhaltens einfließen können.

Für weiterführende Entwicklungen der Saatgut-Matte muss diese in Originalgröße gefertigt und getestet werden. Dadurch kann eine ausführlichere Erprobung der Nährstoffverteilung bei allen fünf Anzuchtkanälen erfolgen. Ein Test über einen längeren Zeitraum, welcher die Verwendung der Matte über mehrere Wachstumsperioden hinweg bedeutet, ist ebenfalls zur Beurteilung der Eignung des Folienmaterials zu empfehlen. In der Kombination mit dem mobilen Anzuchttisch können weiterführende Aspekte der MEPA, wie beispielsweise die Verbindung mithilfe der Drehverschlüsse und Ösen, erprobt werden.

Ein zukünftiger Prototyp des MEPA-Systems ist in der Abbildung 7.6 zu sehen. Hier ist eine Anordnung von zwei Anzuchttischen, einem Frischwassertank und einer Versorgungseinheit abgebildet. Mit einer ASU soll es möglich sein, bis zu vier Anzuchttische zu versorgen.



**Abb. 7.6.:** Eine mögliche Anordnung der MEPA als CAD-Darstellung. Zu sehen sind zwei Anzuchttische, eine Versorgungseinheit und ein Frischwassertank. Auf den Anzuchttischen ist die Saatgut-Matte positioniert, welche durch Schläuche mit der Versorgungseinheit verbunden ist.

## 8. Fazit

Das Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Saatgut-Matte mit der Nährstoff-Film Technik für das MEPA-System. Im Rahmen dessen soll eine Modellversion dieser Saatgut-Matte angefertigt und in einem Versuch getestet werden. Das Ziel ist es, die NFT als geeignete Bewässerungsmethode für die Saatgut-Matte in dem MEPA-System zu erproben.

Zu Beginn der Arbeit werden die bisherigen Ausarbeitungen des MEPA-Systems betrachtet. Die aktuelle Variante ist dabei für den Einsatz einer Saatgut-Matte mit der NFT als Bewässerungstechnik angepasst. Außerdem werden die unterschiedlichen Varianten der hydroponischen Bewässerung erläutert. Aus den Kriterien des MEPA-Systems und den theoretischen Hintergründen der Bewässerung mit der Nährstoff-Film-Technik können Anforderungen an die Saatgut-Matte gestellt werden. Weitere Anforderungen ergeben sich aus den pflanzenspezifischen Eigenschaften. In diesem Fall wird in der Auslegung beispielhaft eine Kultivierung von Salat angestrebt.

In der anschließenden Auslegung der Saatgut-Matte, werden die Komponenten Folienschlauch, Pflanzeninterface, Zu- und Rücklaufadapter sowie das Verbindungselement zum MEPA-System berücksichtigt. Die Materialauswahl für den Folienschlauch fällt auf eine Triplexfolie, bestehend aus einer Aluminiumschicht und zwei Kunststoffschichten. Ein geeignetes Herstellungsverfahren für den Folienschlauch stellt das Heizelementschweißen mit einem Handfolienroller dar. Die Adapter und Pflanzenhalterung sollen additiv im 3D-Druckverfahren gefertigt werden.

In den Vorversuchen konnten wichtige Erkenntnisse zur Fertigung gesammelt werden. Die Vorversuche stellen eine wichtige Ergänzung in der Erprobung der Saatgut-Matte dar und ermöglichen ein iteratives Anpassen der Kanalmaße, sodass die optimale Breite am Kanaleingang von 40 mm und eine Breite der Anzuchtkanäle von 150 mm ermittelt wird. Die im Vorversuch erstellten Folienschläuche bilden die Basis für die Modellversion der Saatgut-Matten, welche im Versuch angewendet werden.

In dem Laborversuch ist eine vierwöchige Kultivierung von insgesamt 24 Salatpflanzen auf zwei Saatgut-Matten erfolgt. Die Salatpflanzen weisen hauptsächlich ein fortgeschrittenes Wachstum auf und das Material zeigt kein Versagen über den Testzeitraum. Anhand der Beobachtungen des Versuchs kann die Auslegung der Matte in ihrer Kanalanordnung und Materialauswahl als positiv beurteilt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Erprobung der Matte im Labor erfolgreich war. Die theoretische Auslegung kann dadurch als gelungen angesehen und die Nährstoff-Film Technik als eine geeignete Methode für das MEPA-System betrachtet werden. Diese Arbeit bildet somit eine Basis zu weiteren Entwicklungen der Saatgut-Matte für einen zukünftigen Prototypen des MEPA-Systems.

# Literaturverzeichnis

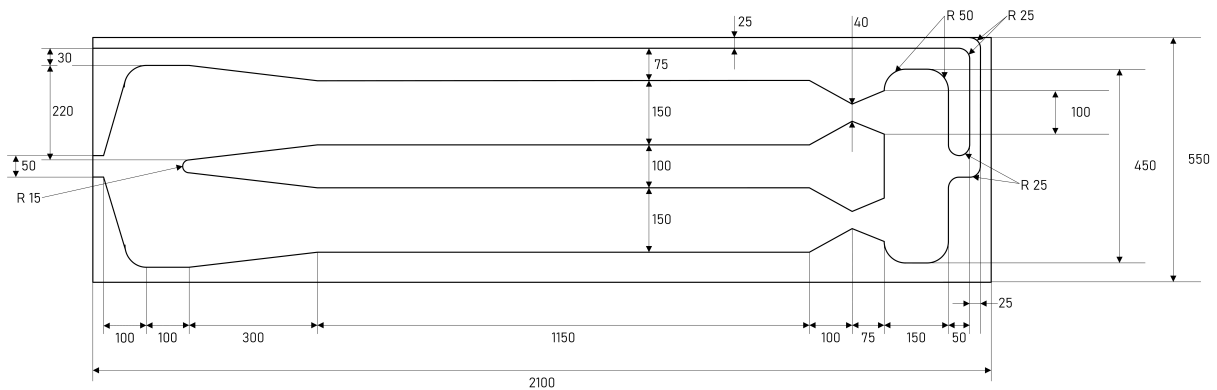
- [1] INTEGRATED FOOD SECURITY PHASE CLASSIFICATION (IPC): *IPCC - Sonderbericht über Klimawandel und Landsysteme (SRCCL)*. 2020
- [2] DEUTSCHE WELTHUNGERHILFE E.V.: *Menschen auf der Flucht - Zahlen und Fakten*. Juni 2020
- [3] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT-UND RAUMFAHRT E.V.: MEPA - Mobile Entfaltbare Pflanzenanbaueinheit für Krisenregionen und Wüsten. (2018)
- [4] WALDEMAR CEKUSOV: *Systementwicklung und Design einer mobilen entfaltbaren Pflanzenanbaueinheit für den Einsatz in Krisenregionen*. September 2019
- [5] MARVIN LIPPS: *Systemanalyse zur Weiterentwicklung des MEPA-Systems für die Pflanzenkultivierung in extraterrestrischen Lebensräumen und terrestrischen Notstandssituationen*. Juni 2020
- [6] MICHAEL RAVIV, J.HEINRICH LIETH, ASHER BAR-THAL (Hrsg.): *Soilless Culture - Theory and Practice*. 2nd Edition. Academic Press (Elsevier), 2019. – ISBN 978-0-12-801775-3
- [7] J.E. ELLS, J.J. Hanan W.D. H. J.D. Butler B. J.D. Butler: Hydroponics - growing plants without soil. In: *Publications - Colorado State University Extension* (1988)
- [8] LASSE POLSFUSS: *Hydroponik Systeme*. Website. <https://www.pflanzenfabrik.de/systeme-der-hydroponik/>. Version: Oktober 2020
- [9] FAO, ISHC AND NCARE (Hrsg.): *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops - Principle for Mediterranean climate areas*. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), 2013, Rome. – ISBN 978-92-5-107649-1
- [10] WADE L. BERRY AND SHARON KNIGHT ; LANGHANS, R.W. (Hrsg.) ; TIBBITTS, T.W. (Hrsg.): *Plant Groth Chamber Handbook*. Iowa State University of Science and Technology, 1997. – 119 – 132 S. <https://www.controlledenvironments.org/growth-chamber-handbook/>. – ISBN 0361-199X
- [11] DR. ANDREAS TEICHERT: NFT-Anbau von Salat in mobilen Rinnen. In: *Züchtungskunde, Ulmer Verlag* 05/2011 (2011), S. 14-15. – ISSN 0044-5401 (print)
- [12] HORTIPLAN N.V.: *Lösungen mit Mobile Gully System (MGS) - Vorteile*. Company Website. <https://www.hortiplan.com/de/advantages>

- [13] R.M. WHEELER: Crop Production for Advanced Life Support Systems – Observations From the Kennedy Space Center Breadboard Project / NASA Biological Sciences Office. 2003. – Technical Memorandum - 2003
- [14] A. J. BOTH: *Ten Years of Hydroponic Lettuce Research*. Bioresource Engineering, Department of Plant Biology and Pathology,
- [15] KLAUS EHRENSPIEL; HARALD MEERKAMM: *Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2017. – ISBN 978-3-446-44089-0
- [16] ALFiPA GMBH & CO. KG: *Technical Data Sheet*. Februar 2021
- [17] HAND DOMININGHAUS: *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendung*. Springer Verlag Heidelberg, 2012. – ISBN 978-3-642-16172-8
- [18] ALFiPA GMBH & CO. KG: *Aluminiumfolien*. Website. <https://alfipa.de/aluminiumfolien/>
- [19] MARTIN BONNET: *Kunststofftechnik - Grundlagen, Verarbeitung, Werkstoffauswahl und Fallbeispiele*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2016 [https://www.ebook.de/de/product/26253174/martin\\_bonnet\\_kunststofftechnik.html](https://www.ebook.de/de/product/26253174/martin_bonnet_kunststofftechnik.html). – ISBN 978-3-658-13827-1
- [20] SCHABOS GMBH: *Betriebsanleitung hpl ISZ 200/300/450/630*. Widdersdorfer Str. 236-240, 50825 Köln
- [21] NORA VOLLING: *Praxissemesterbericht - Forschungsinitiative EDEN*. 2021
- [22] SIN, LEE TIN ; RAHMAT, ABDUL RAZAK ; RAHMAN, WAN AZIAN WAN ABDUL: *Polylactic acid: PLA biopolymer technology and applications*. 1st ed. William Andrew, 2012. – ISBN 9781437744606
- [23] DR. MELISSA BRECHNER, DR. A.J. BOTH: *Hydroponic Lettuce Handbook*. Cornell University, 2013
- [24] OMRON EUROPE B.V. (Hrsg.): *Elektronisches Zeitrelais H3CR*. Cat. No. L03E-DE-01. Wegalaan 67-69, NL-2132 JD, Hoofddorp, Niederlande: OMRON EUROPE B.V., 2013
- [25] HELIOSPECTRA: *Heliospectra LX60 - Usermanual*. Version 1. Göteborg, Sweden: Heliospectra AB, Juni 2014
- [26] APOGEE INSTRUMENTS INC.: *Quantum Meter - Owner's Manual*. 721 WEST 1800 NORTH, LOGAN, UTAH 84321, USA: Apogee Instruments Inc., 2021
- [27] BLUELAB CORPORATION LIMITED: *Bluelab Guardian Monitor - Care and use guide*. 8 Whiore Avenue, Tauriko Industrial Park, Tauranga 3110, New Zealand: Bluelab Corporation Limited, 2011
- [28] FLIR SYSTEMS INC.: *Bedienungsanleitung Temperatur-Datenlogger Modell TH10*. FLIR Systems, Inc., 2013

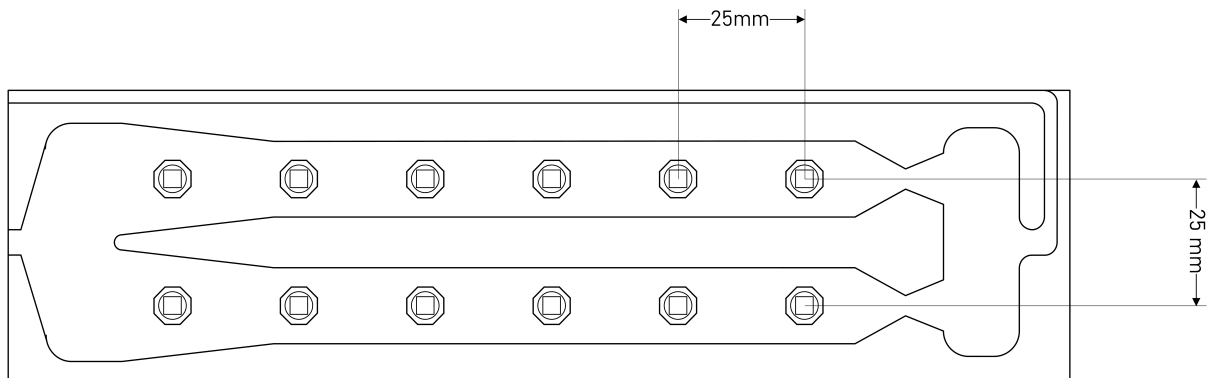
- [29] LIBIA I. TREJO-TÉLLEZ AND FERNANDO C. GÓMEZ-MERINO ; ASAO, Dr. T. (Hrsg.): *Nutrient Solutions for Hydroponic Systems, Hydroponics - A Standard Methodology for Plant Biological Researches*. InTech, 2012. – ISBN 978– 953–51–0386–8
- [30] DIETER HESS: *Pflanzenphysiologie*. 11. Eugen Ulmer KG, 2008. – ISBN 978–3–8252–8393–3. – Beschreibung der Photosynthese
- [31] RICHARD POTT, JOACHIM HÜPPE: *Spezielle Geobotanik, Pflanze - Klima - Boden*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – ISBN 13 978–3–540–49356–3
- [32] MASAKAZU ANPO, HIROKAZU FUKUDAM TERUO WADA (Hrsg.): *Plant Factory Using Artificial Light*. Elsevier, 2019. – ISBN 978–0–12–813973–8

## A. Darstellungen und Zeichnungen

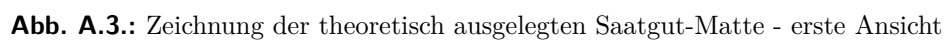
In diesem Anhang sind die Zeichnungen mit den genauen Maßen zu der theoretisch ausgelegten Saatgut-Matte sowie der im Versuch verwendeten Saatgut-Matte dargestellt.

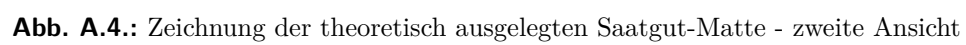


**Abb. A.1.:** Die Maße der im Versuch verwendeten Saatgut-Matte

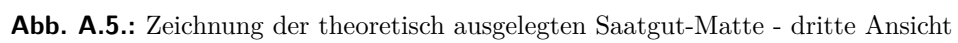


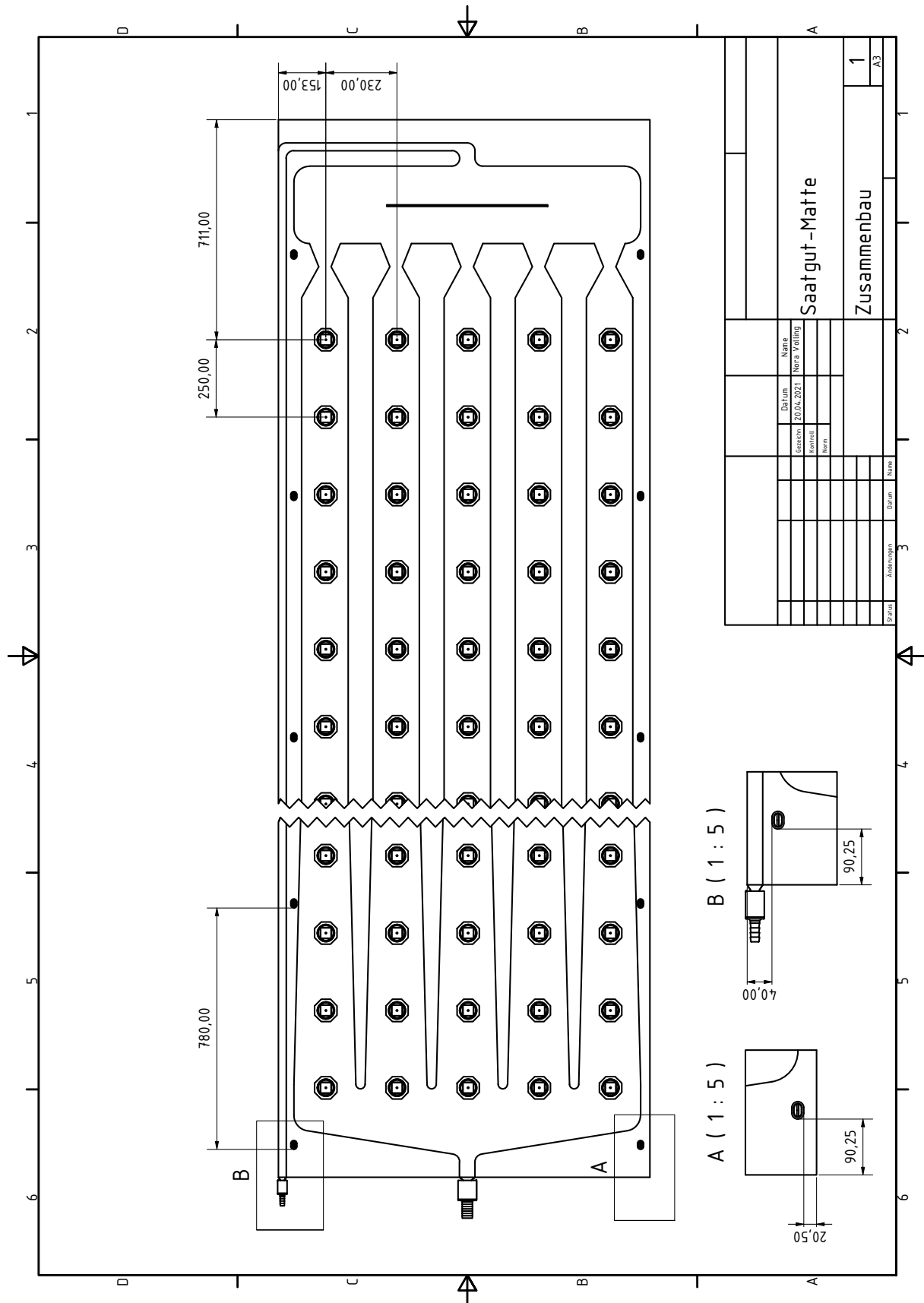
**Abb. A.2.:** Die Positionierung der Pflanzenhalterungen auf der Saatgut-Matte im Laborversuch











**Abb. A.6.:** Zeichnung der Positionen der Interfaces in der Saatgut-Matte. Zu erkennen sind die Abstände und Positionierungen der Ösen und Drehverschlüsse sowie der Pflanzeninterfaces.

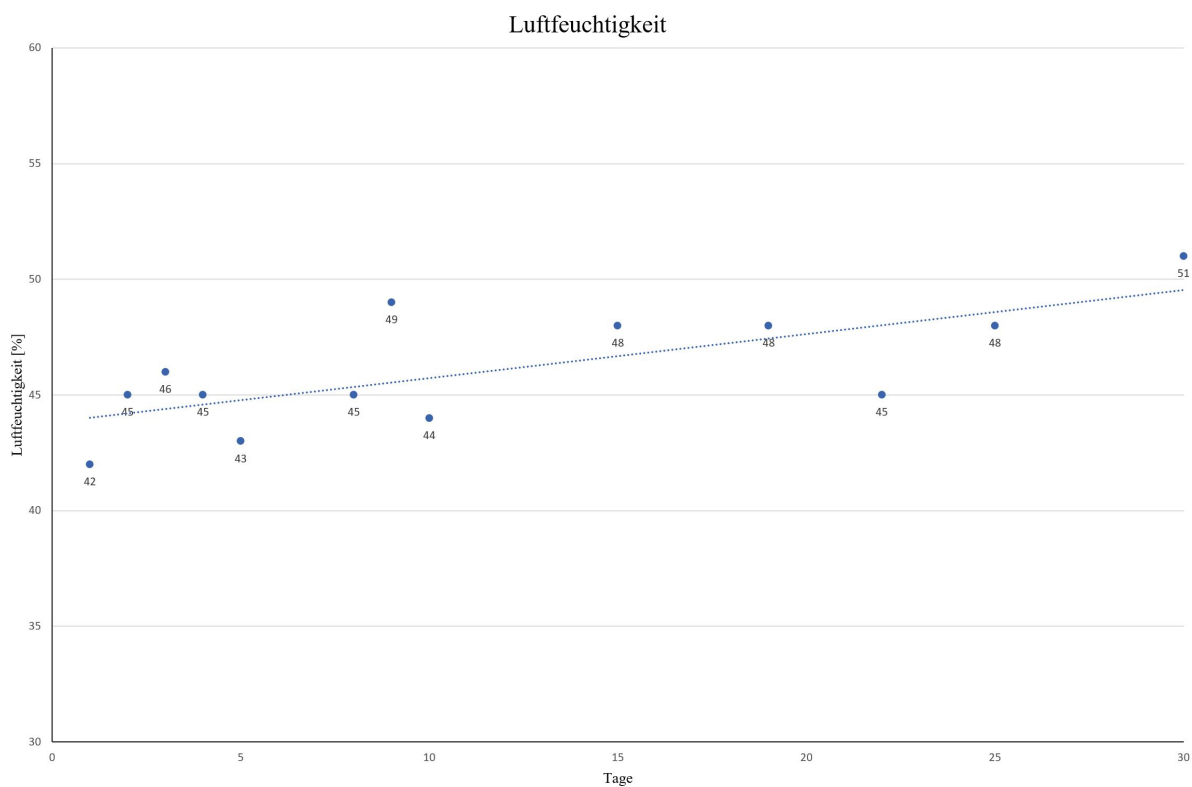
## B. Laboraufzeichnungen

Dieser Anhang beinhaltet die im Laborversuch erstellten Tabellen und Diagramme. Außerdem sind weitere Bilder zu dem Versuch zu sehen.

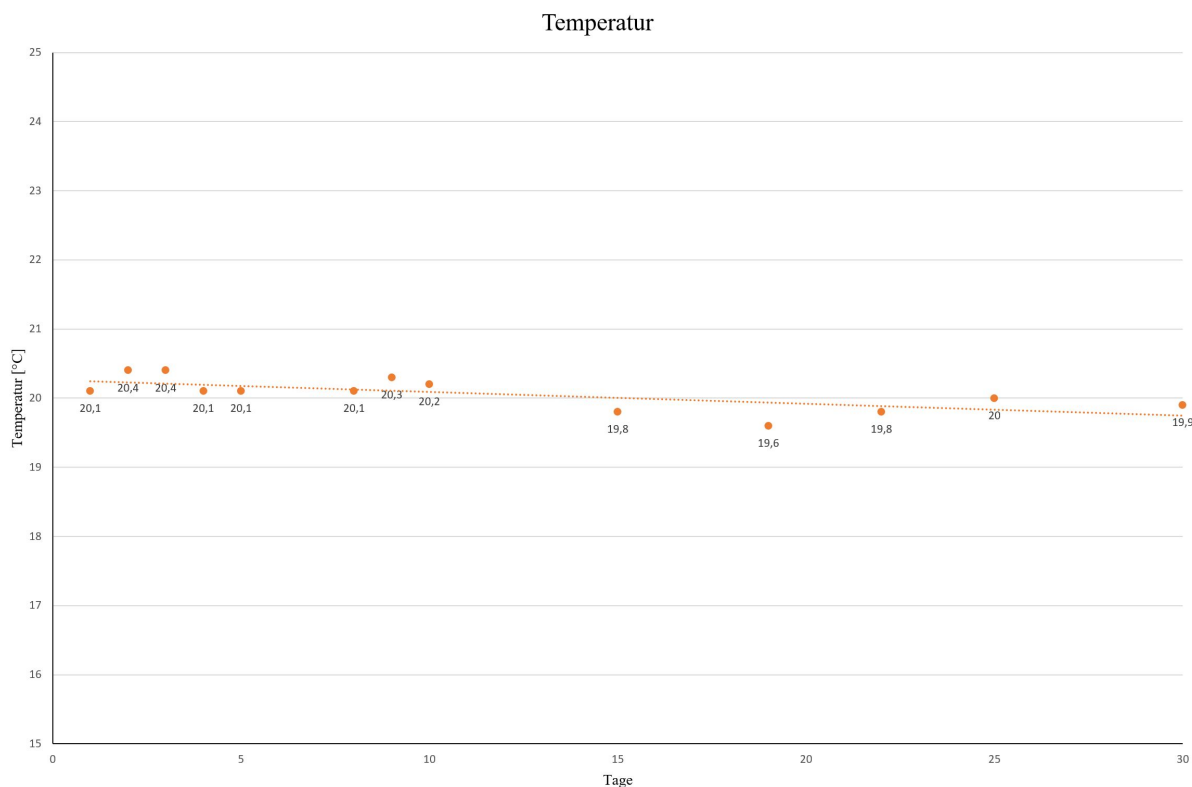
### Labordaten NFT Versuch

Datum	Temperatur [°C]	Luftfeuchtigkeit [%]	EC-Wert [mS/cm]	pH-Wert	
08.03.2021	20,1	42	1,4	5,9	
09.03.2021	20,4	45	1,4	5,9	
10.03.2021	20,4	46	1,4	6,0 ↓ 5,7	
11.03.2021	20,1	45	1,4	5,8	
12.03.2021	20,1	43	1,4	5,8	
13.03.2021					
14.03.2021					
15.03.2021	20,1	45	1,4	5,9 ↓ 5,7	
16.03.2021	20,3	49	1,5	5,8	
17.03.2021	20,2	44	1,5	5,8	
18.03.2021					
19.03.2021					
20.03.2021					
21.03.2021					
22.03.2021	19,8	48	1,5	5,6 ↑ 5,8	
23.03.2021					
24.03.2021					
25.03.2021					
26.03.2021	19,6	48	1,5	5,8	
27.03.2021					
28.03.2021					
29.03.2021	19,8	45	1,5	5,7 ↑ 5,9	
30.03.2021					
31.03.2021					
01.04.2021	20	48	1,5	5,8 ↑ 5,9	
02.04.2021					
03.04.2021					
04.04.2021					
05.04.2021					
06.04.2021	19,9	51	1,5	5,7	

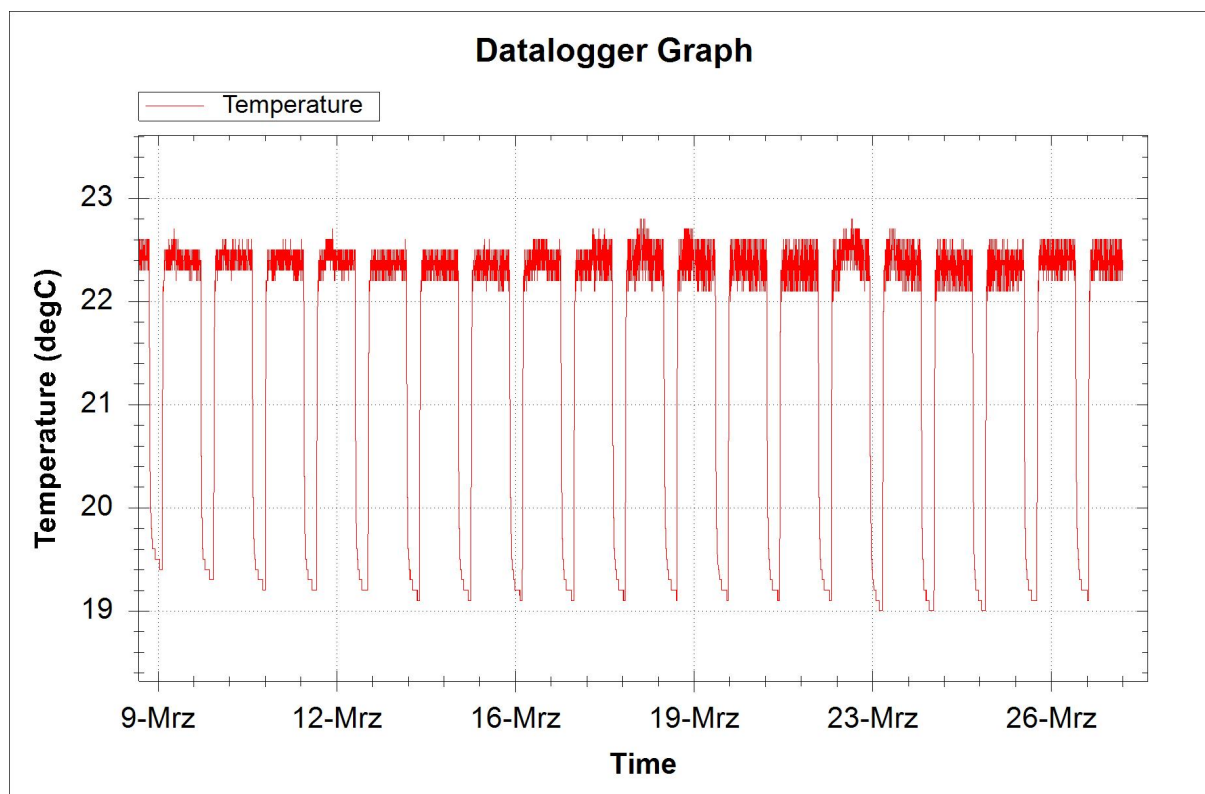
**Abb. B.1.:** Manuell dokumentierte Labordaten zu der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit, dem EC- und pH-Wert



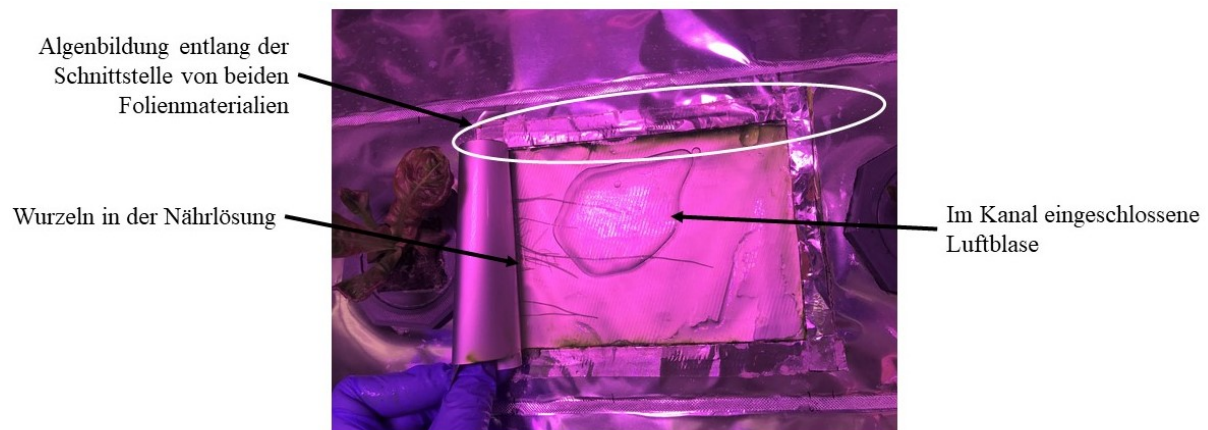
**Abb. B.2.:** Diagramm zu der Luftfeuchtigkeit im Labor. Erstellt aus den dokumentierten Daten aus der Tabelle in Abbildung B.1



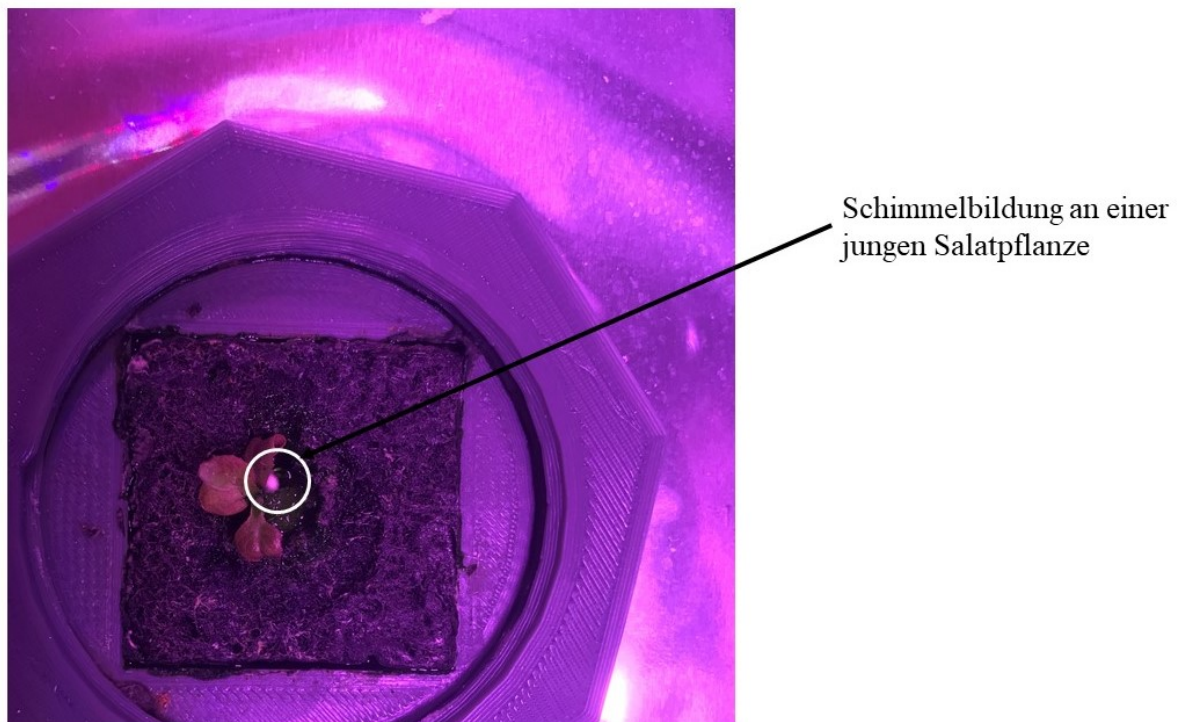
**Abb. B.3.:** Diagramm zu der Temperatur im Labor. Erstellt aus den dokumentierten Daten aus der Tabelle in Abbildung B.1



**Abb. B.4.:** Temperaturdiagramm des zweiten Datenloggers. Der Aufzeichnungszeitraum bricht am Tag 20 des Versuchs ab.



**Abb. B.5.:** Das Sichtfenster in Kanal 1.1. Zu erkennen ist die Algenbildung an den Rändern des Sichtfensters. Außerdem ist auf der Abbildung das Wurzelwachstum innerhalb des Kanals zu sehen sowie eine eingeschlossene Luftblase.



**Abb. B.6.:** Schimmelbildung neben einer Salatpflanze auf der Steinwolle. Die Pflanze befindet sich in einem jungen Wachstumsstadium.

## C. Datenblätter

In diesem Anhang sind die Datenblätter zu der Folie, dem Quantensensor, dem Messgerät zu EC- und pH-Wert und dem Zwillingsrelais zu finden.



### TECHNICAL DATA SHEET

PET12 + AL8 + LLDPE100

#### AlFiPa GmbH & Co KG

Gereonstr 71-73 50670 Cologne  
Telephone +49 221 67788 759  
Fax +49 221 16931 769  
www.alfipa.com

10.02.2021

#### Product description:

This product is a three-layer triplex laminate made from Polyester, Aluminium and Polyethylene. It is a barrier film used in packaging and insulation applications.


#### Technical characteristics:

Properties	Value	Conditions	Test method
Unit weight	135.5 g/m <sup>2</sup>	-	Internal
Thickness	123 µ	-	Internal
Yield	7.38 m <sup>2</sup> /kg	-	Internal
Sealing strength	30 N/15mm	165 °C, 4 bar for 1.5 seconds	Internal
Adhesion strength			
– PET/AL	1.5 N/15 mm	-	Internal
– AL/PE	2.5 N/15 mm	-	Internal
Oxygen transfer rate	0.5 cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	23 °C for 24 hours at 0 % relative humidity	ASTM D 3985
Water vapour transmission rate	0.5 g/m <sup>2</sup>	38 °C for 24 hours at 90 % relative humidity	ASTM F 1249
Coefficient of friction	0.25	PE/PE	ASTM D 1894

This document remains the property of AlFiPa. Distribution is prohibited without explicit prior authorization.

The values above do not represent product specifications but are representative of the typical values based on laboratory results with a  $\pm 3$  % tolerance. Unless expressly agreed in writing, no guarantee can be accepted for the suitability of the material for a particular application and there is no obligation or liability for the contained application notes. It is the responsibility of the purchaser to verify whether the material is suitable for the purposes and to assume the full risk for the use of the material. The material is guaranteed for a period of six months but is possible the use up to one year after the production date. The material must be kept in its original packing and must be stored in a dry place with an ambient temperature between 15 and 30°C and a relative humidity of 20-80%. The material must be kept far from direct sunlight and heating source. The film should be transferred to the processing area at least 24 hours before processing. We recommend to remove the film from the original packaging immediately before processing.

**Abb. C.1.:** Technisches Datenblatt zu den Materialeigenschaften der Triplexfolie

 <b>Technical specifications</b>			
Specifications	pH	Conductivity	Temperature
Units:	pH	EC, CF, TDS, ppm 700	°C, °F
Measurement range:	0.0 – 14.0 pH	0 – 5.0 EC, 0 – 50 CF 0 – 2500 TDS (ECx500) 0 – 3500 ppm (ECx700)	0 – 50 °C 32 – 122 °F
Resolution:	0.1 pH	0.1 EC 1 CF 10 TDS 10 ppm	1 °C 1 °F
Accuracy at 25 °C / 77 °F:	±0.1 pH	±0.1 EC ±1 CF ±50 TDS ±70 ppm	±1 °C ±2 °F
Calibration:	Two point pH 7.0, and pH 4.0 or pH 10.0	Not required (factory calibrated)	Not required (factory calibrated)
Automatic Temperature Compensation (ATC):	Yes (if conductivity/ temperature probe is in same solution as pH probe)	Yes	Not applicable
Operating environment:	0 – 50 °C / 32 – 122 °F		
Power source:	Input: 100-240 Vac, 50-60 Hz, 5 VA output: 5VDC 1Amp, 4 interchangeable plug types (USA, Euro, UK, NZ/AUS)		
Other functions:	Greater tolerance to RF/electronic interference provided, silent visual alarm (high and low settings), adjustable display brightness, water resistant, non-volatile memory, over and under range indicators		
Guarantee period:	<b>Bluelab Guardian Monitor:</b> 2 years <b>Bluelab pH Probe:</b> 6 months		

BluelabGuardian/TechnicalSpecifications/Version 1: 090612/00878\_0612

Abb. C.2.: Technische Daten des Bluelab Guardian



**apogee**  
INSTRUMENTS

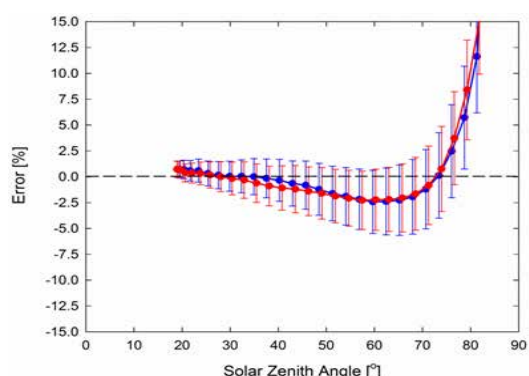
## ORIGINAL QUANTUM METERS

MQ-100, MQ-200, & MQ-300 Series

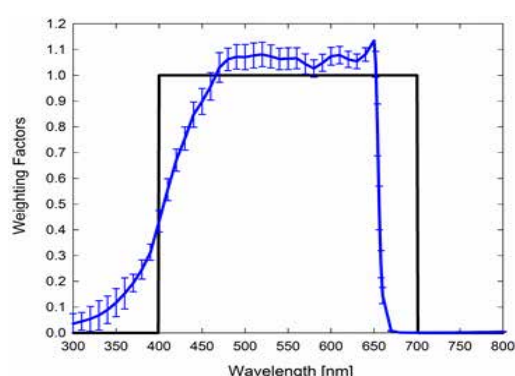
MQ-200



### Response Graphs



Mean cosine response of twenty-three SQ series quantum sensors. Blue points represent the AM response and red points represent the PM response.



Mean spectral response of six SQ series quantum sensors (error bars represent two standard deviations above and below mean) compared to PPFD weighting function.

### Product Specifications

	MQ-100	MQ-200	MQ-301	MQ-303/306
Calibration Uncertainty	± 5 %			
Measurement Repeatability	Less than 1 %			
Long-term Drift	Less than 2 % per year			
Non-linearity	Less than 1 % (up to 3000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )			
Response Time	Less than 1 ms			
Field of View	180°			
Spectral Range	410 to 655 nm (wavelengths where response is greater than 50 % of maximum)			
Directional (Cosine) Response	± 5 % at 75° angle			
Temperature Response	0.06 ± 0.06 % per C			
Operating Environment	0 to 50 C; less than 90 % non-condensing relative humidity up to 30 C; less than 70 % non-condensing relative humidity from 30 to 50 C; separate sensors can be submerged in water up to depths of 30 m			
Meter Dimensions	113.9 mm height, 59.9 mm width			
Sensor Dimensions	Integrated with Meter	24 mm width, 33 mm height	700 mm length, 15 mm width, 15 mm height	500 mm length, 15 mm width, 15 mm height
Mass	150 g	180 g	380 g	300 g
Cable	2 m of shielded, twisted-pair wire; additional cable available; TPR jacket (high water resistance, high UV stability, flexibility in cold conditions)			
Warranty	4 years against defects in materials and workmanship			

Abb. C.3.: Datenblatt zu dem MQ 200

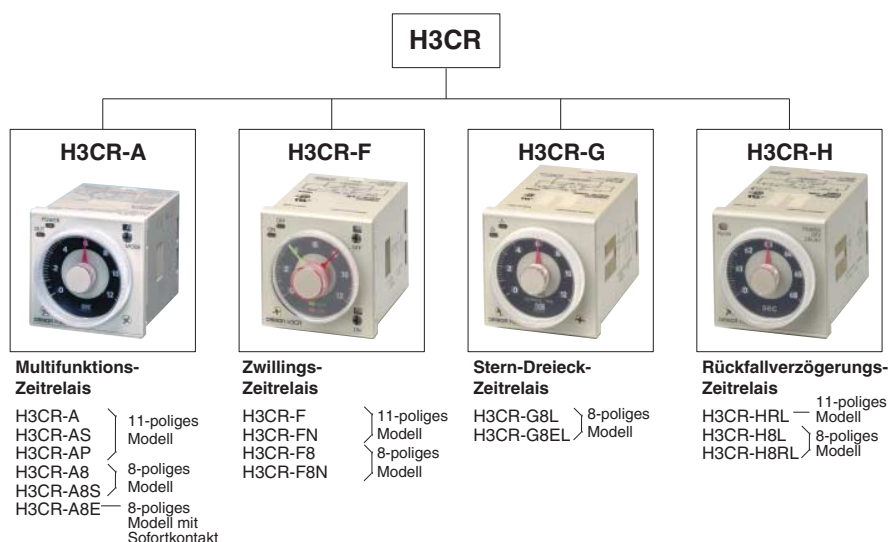
## Elektronisches Zeitrelais H3CR

Bitte lesen Sie vor dem Kauf der Produkte diesen Datenblatt, und stellen Sie sicher, dass Sie alles verstanden haben. Bei Fragen oder Anmerkungen wenden Sie sich bitte an Ihre OMRON-Vertretung. Siehe *Vereinbarung über allgemeine Bedingungen* (Seite 58) und *Sicherheitshinweise* (Seite 23, 49, 56).

### Multifunktionelle Zeitrelais-Serie in DIN-Größe 48 × 48 mm

- Entspricht EN61812-1 und IEC60664-1 4 kV/2 für Niederspannung und EMV-Richtlinien
- UL- und CSA-Zulassung.
- Lloyds/NK-Zulassungen.
- Sechssprachiges Bedienungsanleitung beiliegend.

### ■ Breite Modellpalette der H3CR-Serie



**Hinweis:** H3CR-AS, H3CR-A8S: Transistorausgang-Modelle

### Inhalt

#### Elektronisches Zeitrelais

H3CR-A .....	2
H3CR-F .....	25
H3CR-G .....	33
H3CR-H .....	41

#### Gemeinsam für alle Zeitrelais

Funktion .....	50
Zubehör .....	52
Sicherheitshinweise .....	56

OMRON

1

**Abb. C.4.:** Die Datenangaben zu dem Zwillingsrelais H3CR